



ESCOLA SUPERIOR
DE TECNOLOGIA
E GESTÃO

**Desenvolvimento, via simulação computacional
(CFD) e experimental, de um sistema de gestão
térmica de baterias de íões de lítio**

Mestrado em Engenharia Automóvel

João Rafael Martins Gaspar

Leiria, março de 2024



**POLITÉCNICO
DE LEIRIA**

ESCOLA SUPERIOR
DE TECNOLOGIA
E GESTÃO

**Desenvolvimento, via simulação computacional
(CFD) e experimental, de um sistema de gestão
térmica de baterias de íões de lítio**

Mestrado em Engenharia Automóvel

João Rafael Martins Gaspar

Trabalho de Projeto de Mestrado em Engenharia Automóvel realizado sob a orientação do
Professor Doutor Nuno Alexandre Gonçalves Martinho

Leiria, março de 2024

Originalidade e Direitos de Autor

O presente relatório de Projeto de Mestrado em Engenharia Automóvel é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Automóvel, no ano letivo 2023/2024, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Dedicatória

O presente relatório é dedicado aos meus avós, que faleceram semanas antes da entrega do mesmo.

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer à minha família por todo o apoio ao longo de todo o meu percurso académico, especialmente nos momentos mais difíceis.

Gostaria também de agradecer ao Professor Doutor Nuno Martinho, por toda a orientação fornecida e pela disponibilidade que ofereceu ao longo desta tese.

Quero ainda agradecer à equipa da *Newcraft*. Cada um apoiou o trabalho desenvolvido à sua maneira e por isso o meu sincero obrigado.

Por fim, gostaria de agradecer ao Engenheiro Diogo Duro, por todo o auxílio prestado durante a realização da parte experimental.

Resumo

A crescente necessidade de otimizar a eficiência energética e a segurança em veículos elétricos tem impulsionado o aperfeiçoamento contínuo dos sistemas de gestão térmica de baterias de íons de lítio. O presente trabalho, realizado no âmbito do Projeto de Mestrado em Engenharia Automóvel, dedicou-se ao desenvolvimento e à avaliação de um sistema de gestão térmica por imersão líquida, através de simulações numéricas computacionais e ensaios experimentais, visando responder às exigências de desempenho térmico e à fiabilidade sob condições operacionais variadas.

Para as simulações numéricas computacionais foi considerado, em simultâneo, a produção de calor no interior das células durante a sua carga/descarga, através de um modelo numérico próprio para o efeito, e a consequente dissipação do calor produzido através de um sistema de refrigeração líquida, através de um programa comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

Complementarmente, realizaram-se ensaios experimentais para validar os modelos numéricos, utilizando uma montagem construída especificamente para o efeito, que permitiu monitorizar a resposta térmica das células sob condições de carga variadas.

O desenvolvimento do invólucro do conjunto de células (bateria), um dos temas principais do trabalho, foi realizado através de um processo iterativo, típico de um produto desenvolvido com recurso a ferramentas de engenharia assistida por computador, tendo como principal objetivo uma refrigeração eficiente e homogénea do respetivo conjunto de células. A geometria inicial do invólucro foi desenhada com base na geometria de um invólucro já existente numa empresa, na qual o presente projeto foi desenvolvido, que pretende vir a usar a bateria num motociclo de competição de todo-o-terreno que se encontra a ser desenvolvido na mesma empresa.

Para a aquisição e tratamento dos dados experimentais, foi ainda desenvolvido um sistema eletrónico específico para a montagem experimental em causa.

Os resultados indicam que a implementação de um sistema de imersão líquida contribui significativamente para a homogeneização da temperatura entre as células, reduzindo o risco de degradação acelerada e melhorando a eficiência geral do sistema de baterias. As análises

demonstraram também que este tipo de sistema de gestão térmica permite a homogeneização de temperaturas de células mesmo com caudais de fluido reduzidos.

Palavras-chave: sistema de gestão térmica, imersão líquida, células eletroquímicas, íons de lítio, dinâmica de fluidos computacional (CFD), transferência de calor

Abstract

The growing need to optimize energy efficiency and safety in electric vehicles has driven the continuous improvement of lithium-ion battery thermal management systems. This work, conducted as part of a Master's Project in Automotive Engineering, was dedicated to the development and evaluation of a liquid immersion thermal management system, through computational numerical simulations and experimental trials, aiming to meet the demands of thermal performance and reliability under varying operational conditions.

For the computational numerical simulations, both the heat generation inside the cells during their charging/discharging, using a numerical model specifically designed for this purpose, and the subsequent dissipation of the produced heat through a liquid cooling system, using a commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) program, were considered simultaneously.

Additionally, experimental trials were conducted to validate the numerical models, using an assembly specifically constructed for this purpose, which allowed for the monitoring of the cells' thermal response under various loading conditions.

The development of the enclosure for the cell assembly (battery), one of the main themes of this work, was carried out through an iterative process typical of a product developed using computer-aided engineering tools, balancing the results of the numerical simulations and the primary goal of achieving efficient and homogeneous cooling of the respective cell assembly. The initial geometry of the enclosure was designed based on the geometry of an existing enclosure at a company where this project was developed, which intends to use the battery in an off-road competition motorcycle currently under development there.

For the acquisition and processing of experimental data, a specific electronic system was also developed for the experimental assembly in question.

The results indicate that the implementation of a liquid immersion system significantly contributes to the homogenization of temperature among the cells, reducing the risk of accelerated degradation and enhancing the overall efficiency of the battery system. The analyses also demonstrated this system allows for the homogenization of cell temperatures even at lower fluid flow rates.

Keywords: thermal management system, liquid immersion, electrochemical cells, lithium ions, Computational Fluid Dynamics (CFD), heat transfer.

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	iii
Dedicatória	v
Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
Lista de figuras	xv
Lista de tabelas	xix
Lista de siglas e acrónimos	xx
Lista de variáveis	xxi
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Organização do relatório	4
2. Fundamentos e estado da arte	5
2.1. Fundamentos	5
2.1.1. Células eletroquímicas.....	5
2.1.1.1. Principais características das células de lítio	7
2.1.1.2. Influência da temperatura no desempenho das células.....	10
2.1.1.3. Configuração física de montagens de células.....	12
2.1.1.4. Sistemas de gestão térmica de células eletroquímicas	15
2.1.2. Transferência de calor	20
2.1.2.1. Condução	21
2.1.2.2. Convecção	23
2.1.2.3. Radiação	26
2.1.3. Dinâmica de Fluidos Computacional	28
2.1.3.1. Discretização das equações de conservação	30
2.1.3.2. Resolução das equações discretizadas e erros	33
2.1.3.3. Modelo de turbulência	36
2.1.3.4. Tratamento numérico das camadas limite	38
2.1.3.5. Modelo de célula MSMD	40
2.1.3.6. Critérios de seriação de malha.....	42
2.1.3.7. Metodologia para a elaboração de um modelo CFD	43
2.2. Estado da arte	45
2.2.1. Sistemas de gestão térmica com recurso a ar	46
2.2.2. Sistemas de gestão térmica com recurso a líquidos.....	47

3.	Caso de referência – caracterização térmica de uma única célula	53
3.1.	Condições de fronteira	53
3.2.	Métodos numéricos	54
3.2.1.	Estudo de dependência de malha no caso de referência	55
3.2.2.	Estudo CFD do caso de referência.....	57
4.	Caso de estudo – arrefecimento de bloco de células de lítio	60
4.1.	Características do caso de estudo	60
4.2.	Desenvolvimento do invólucro	63
4.2.1.	Otimização das camaras de equilíbrio de pressão	66
4.2.2.	Otimização dos apoios de célula	72
4.2.3.	Desenvolvimento das zonas de fixação das busbars	76
4.2.4.	Sensores e pontos de medição	78
4.3.	Métodos numéricos	79
4.3.1.	Estudo de dependência de malha no caso de estudo	79
4.3.2.	Simulação numérica (CFD) do caso de estudo	80
4.4.	Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados	83
4.4.1.	Desenvolvimento de <i>hardware</i>	84
4.4.2.	Desenvolvimento de <i>firmware</i>	86
4.5.	Montagem experimental	91
4.5.1.	Características físicas	92
4.5.2.	Metodologia de recolha de dados	95
5.	Apresentação e análise resultados	99
5.1.	Estudo de dependência de malha.....	99
5.2.	Análise de resultados.....	100
6.	Conclusões e propostas de trabalho futuro.....	107
6.1.	Principais conclusões.....	107
6.2.	Propostas de trabalho futuro	108
	Bibliografia	109

Lista de figuras

Figura 1.1 – Canais de refrigeração e outros componentes do BTMS do modelo Q4 etron do construtor Audi, adaptado de (Leichsenring, 2021)	2
Figura 2.1 – Esquemático genérico de uma célula eletroquímica, adaptado de (Dr Bhatt et al., 2023)	6
Figura 2.2 – Reações químicas de uma célula de lítio, adaptado de (Kang, 2015).....	6
Figura 2.3 – Esquemático de formação de dendrites, adaptado de (MSE Supplies, 2019).....	11
Figura 2.4 – Gráfico da relação entre capacidade e tensão aos polos da célula a diferentes temperaturas, adaptado de (Zhang et al., 2022)	12
Figura 2.5 – Esquemáticos de ligação de células em série (A) e paralelo (B), adaptado de (Battery University, 2021).....	13
Figura 2.6 – Estrutura típica de uma bateria de um veículo elétrico/híbrido, adaptado de (Automotive Cells Company, 2022)	14
Figura 2.7 – Exemplos de <i>busbars</i> , adaptado de (Connor Manufacturing, 2024)	14
Figura 2.8 – Esquemático genérico de um sistema de gestão térmica que recorre a uma tomada de ar forçada, adaptado de (Zhang et al., 2022)	16
Figura 2.9 – Esquemático genérico de um sistema de gestão térmica que recorre ao ar refrigerado pelo sistema de ar condicionado, adaptado de (Kim et al., 2019)	16
Figura 2.10 – Esquemático genérico de um sistema de gestão térmica com recurso a um fluido, adaptado de (Zhang et al., 2022)	17
Figura 2.11 – Esquemático genérico de um sistema de gestão térmica com recurso a fluido e <i>cooling pipe</i> , adaptado de (Kim et al., 2019)	18
Figura 2.12 – Diferentes tipos de aplicação de um sistema de gestão térmica de imersão líquida, adaptado de (Roe et al., 2022)	19
Figura 2.13 – Tipos de aplicação de PCM em sistemas de gestão térmica de células, adaptado de (Zhang et al., 2022).....	20
Figura 2.14 – Tipos de transferência de calor, adaptado de (Incropera et al., 2007)	21
Figura 2.15 – Esquemático de transferência de calor por convecção num gás contido entre duas superfícies a temperaturas distintas, adaptado de (Incropera et al., 2007).....	21
Figura 2.16 – Influencia da superfície estática e aquecida nos perfis de velocidade e temperatura do escoamento, adaptado de (Incropera et al., 2007).....	24
Figura 2.17 – Tipos de transferência de calor por convecção, adaptado de (Incropera et al., 2007)	25
Figura 2.18 – Esquemático de transferência de calor por radiação, adaptado de (Incropera et al., 2007)	26
Figura 2.19 – Exemplo de malha bidimensional, adaptado de (Martinho, 2024)	30
Figura 2.20 – Exemplo de um elemento de malha bidimensional, adaptado de (Martinho, 2024).....	32

Figura 2.21 – Perfil de velocidades junto a uma superfície sólida, adaptado de (Martinho, 2024).....	39
Figura 2.22 – Critérios de seriação de malhas, adaptado de (Ansys Inc., 2015).....	43
Figura 2.23 – Esquemático sistema gestão térmica de células recorrendo ao fluxo de ar, adaptado de (Tsuchiya et al., 2014).....	46
Figura 2.24 – Vista em corte do sistema de sistema de refrigeração recorrendo ao fluxo de ar, adaptado de (Tsuchiya et al., 2014).....	47
Figura 2.25 – Vista em corte do sistema de gestão térmica com fluido em contacto indireto aplicado no Lucid Air, adaptado de (Rawlinson, 2014).....	48
Figura 2.26 – Vista isométrica do sistema de refrigeração a fluido indireto de células, adaptado de (Lucid Motors, 2022).....	49
Figura 2.27 – Esquerda: Detalhe dos canais de fluido (Hermann, 2012); Direita: Vista de topo dos canais de fluido (Bhowmick, 2021).....	49
Figura 2.28 – Vista de detalhe dos pontos de entrada e saída de fluido, adaptado de (Battery Design, 2022)	50
Figura 2.29 – Vista explodida do bloco de células e sistema de gestão térmica de imersão líquida, adaptado de (Totman et al., 2021).....	51
Figura 2.30 – Vista em corte do bloco de células e sistema de gestão térmica de imersão líquida, adaptado de (Totman et al., 2021).....	52
Figura 3.1 – Geometria do volume de controlo do caso de referência, adaptado de (P. B. Silva, 2023).....	54
Figura 3.2 – Pontos de medição de velocidade do escoamento para o estudo de dependência de malha.....	56
Figura 3.3 – Resultados do estudo de dependência de malha para o caso de referência.....	56
Figura 3.4 – Comparação entre os resultados obtidos em (P. B. Silva, 2023) e o caso de referência.....	58
Figura 4.1 – Gráfico caudal volumétrico vs pressão gerada da bomba Pierburg CWA-150, adaptado de (Tecomotive, 2024).....	61
Figura 4.2 – Esquemático simplificado da redução do invólucro desenvolvido em relação ao original.....	62
Figura 4.3 – Esquemático simplificado das ligações do fluido de refrigeração no veículo.....	62
Figura 4.4 – Invólucro original desenvolvido na empresa parceira.....	64
Figura 4.5 – Geometria do <i>casing</i> que contém os módulos aplicado no veículo.....	65
Figura 4.6 – Localização dos apoios de célula, apenas um quarto do invólucro representado.....	65
Figura 4.7 – Versão final do invólucro desenvolvido.....	66
Figura 4.8 – Vista de topo das camaras de pressão desenvolvidas no invólucro.....	67
Figura 4.9 – Vista de topo dos canais de fluido entre as células.....	67
Figura 4.10 – Vista de topo dos pontos de passagem da camara de pressão para os canais de fluido entre células.....	68
Figura 4.11 – Pontos de monitorização de velocidade de fluido para o estudo de dependência de malha da otimização das camaras de pressão.....	69

Figura 4.12 – Resultados do estudo de dependência de malha para a otimização das camaras de pressão com caudal de entrada de 0,0884 kg/s.....	70
Figura 4.13 – Perfil de pressões final obtido ao longo do plano de simetria do invólucro com caudal de entrada de 0,0884 kg/s.....	70
Figura 4.14 – Esquerda: Apoios de célula longos; Direita: Apoios de célula curtos.....	72
Figura 4.15 – Resultados do estudo de dependência de malha para a geometria com apoios de célula longos e caudal de entrada de 0,0884 kg/s.....	73
Figura 4.16 – Resultados do estudo de dependência de malha para a geometria com apoios de célula curtos e caudal de entrada de 0,0884 kg/s.....	73
Figura 4.17 – Zonas de colagem de <i>busbars</i>	77
Figura 4.18 – Processo de soldadura <i>wirebonding</i>	77
Figura 4.19 – Estrutura de tomada de pressão.....	78
Figura 4.20 – Pontos de medição de temperatura e identificação das células relevantes	79
Figura 4.21 – Geometria simplificada para o estudo de dependência de malha para o caso de estudo	80
Figura 4.22 – Geometria completa usada na construção do modelo CFD final	82
Figura 4.23 – Detalhe da granularidade da malha de superfície (cima) e malha de volume (baixo)	83
Figura 4.24 – Circuito eletrónico de aquisição de dados desenvolvido.....	84
Figura 4.25 – Sensor de pressão diferencial MPX5010DP da marca NXP, adaptado de (DigiKey, 2024a) ...	85
Figura 4.26 – Sensor de temperatura NTCLE305E4103SBA, adaptado de (DigiKey, 2024b)	86
Figura 4.27 – Sensor de caudal YF-S201, adaptado de (PTRobotics, 2024).....	86
Figura 4.28 – Fluxograma geral do <i>firmware</i> desenvolvido.....	87
Figura 4.29 – Fluxograma da tarefa de controlo de teste.....	87
Figura 4.30 – Fluxograma da tarefa de armazenamento e exibição de informação.....	88
Figura 4.31 – Fluxograma da tarefa de leitura de temperaturas e pressão	89
Figura 4.32 – Fluxograma da tarefa de leitura de temperaturas e pressão	90
Figura 4.33 – Montagem experimental desenvolvida.....	91
Figura 4.34 – Protótipo de validação do modelo numérico	92
Figura 4.35 – Carga eletrónica DC BK Precision 8514B, adaptado de (B&K Precision, 2024)	93
Figura 4.36 – Banho térmico PolyScience 9102, adaptado de (Cole-Parmer, 2024).....	94
Figura 5.1 – Pontos de medição de velocidade colocados sobre o plano de simetria do volume de fluido.....	99
Figura 5.2 – Resultados do estudo de dependência de malha para o caso de estudo, com caudal de entrada de 0,0844 kg/s	100

Figura 5.3 – Valores de temperatura das células obtidos a partir do modelo numérico com células em descarga a 4C e caudal de entrada de 0,0266 kg/s	101
Figura 5.4 – Representação gráfica das temperaturas no instante em que se observou maior heterogeneidade com as células em descarga a 4C e caudal de entrada de 0,0266 kg/s	102
Figura 5.5 – Valores de temperatura das células obtidos a partir da montagem experimental com células em descarga a 4C e caudal de entrada de 0,0266 kg/s	103
Figura 5.6 – Gráfico comparativo entre temperaturas da célula quente na montagem experimental e modelo CFD.....	104
Figura 5.7 – Gráfico comparativo entre temperaturas da célula fria na montagem experimental e modelo CFD	104
Figura 5.8 – Gráfico comparativo entre temperatura de saída do fluido e temperatura da célula fria na montagem experimental	105
Figura 5.9 – Gráfico de banda de cores para o número de Reynolds do escoamento no plano de simetria (esquerda) e no plano que dista 25mm do plano de simetria e paralelo ao mesmo (direita) com caudal de entrada de 0,0266 kg/s	106

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens dos métodos de resolução numérica da camada limite.....	39
Tabela 3.1 – Condições do caso de referência.....	54
Tabela 3.2 – Configuração da simulação numérica para estudo de dependência de malha no volume de fluido dielétrico.....	55
Tabela 3.3 – Configuração da simulação numérica do modelo final do caso de referência.....	57
Tabela 4.1 – Condições do caso de estudo.....	61
Tabela 4.2 – Configurações dos modelos de otimização das camaras de equilíbrio de pressão.....	68
Tabela 4.3 – Valores dos caudais medidos em cada canal entre células após otimização das passagens com caudal de entrada de 0,0884 kg/s.....	71
Tabela 4.4 – Valores dos caudais medidos em cada canal entre células após otimização das passagens com caudal de entrada de 0,0226 kg/s.....	71
Tabela 4.5 – Configurações dos modelos de otimização dos apoios de células.....	74
Tabela 4.6 – Tabela de resultados da otimização dos apoios de células.....	76
Tabela 4.7 – Configurações dos modelos do estudo de dependência de malha para o caso de estudo.....	80
Tabela 4.8 – Configurações do modelo CFD do caso de estudo.....	81
Tabela 4.9 – Condições de início e fim do ensaio experimental.....	95

Lista de siglas e acrónimos

BMS	<i>Battery Management System</i>
BTMS	<i>Battery Thermal Management System</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
ECM	<i>Equivalent Circuit Model</i>
MSMD	<i>Multi-Scale Multi-Domain</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
NTGK	Newman-Tiedemann-Gu-Kim
PCM	<i>Phase Changing Material</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SOC	<i>State of Charge</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
XsYp	Representação do número de células em série (X) e paralelo (Y)

Lista de variáveis

α	Absortividade da superfície []
C_p	Calor específico [J/g·K]
Q	Capacidade [Ah]
Q_m	Caudal mássico [kg/s]
Q_{vol}	Caudal volumétrico [l/min]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² ·K]
u	Componente da velocidade na direção i [m/s]
x	Comprimento [m]
σ_+ e σ_-	Condutividade efetiva dos eléctrodos positivo e negativo [S/m]
k	Condutividade térmica [W/m·K]
I	Corrente [A]
ρ	Densidade do fluido [kg/m ³]
Γ_{eff}	Difusividade efetiva [m ² /s]
ε	Emissividade da superfície []
U	Energia interna do fluido [J]
q''_x	Fluxo de calor [W/m]
q''	Fluxo de calor por unidade de área [W/m ²]
f	Frequência [Hz]
G	Irradiação da superfície [Wh/m ²]
P	Potência [W]
E_b	Potência emissiva [W/m ²]
φ_+ e φ_-	Potenciais de campo dos eléctrodos positivo e negativo [V]
p	Pressão do fluido [Pa]
R	Resistência [Ω]
\dot{q}_{short}	Taxa de calor gerado devido a um curto-circuito interno [W/m ³]
\dot{q}_{ECh}	Taxa de calor gerado devido às reações eletroquímicas [W/m ³]
\dot{q}_{abuse}	Taxa de calor gerado em condições de <i>thermal runaway</i> [W/m ³]
\dot{q}	Taxa de geração de calor volumétrico [W/m ³]
j_{short}	Taxa de transferência volumétrica de corrente devido a um curto-circuito interno [A/m ³]

j_{Ech}	Taxa de transferência volumétrica de corrente devido às reações eletroquímicas [A/m ³]
T	Temperatura [°C ou K]
t	Tempo [s]
V	Tensão [V]
\vec{v}	Vetor velocidade do fluido numa coordenada [m/s]
μ_{eff}	Viscosidade efetiva [kg/m·s]
Vol	Volume do elemento de integração [m ³]

1. Introdução

Com a crescente pressão para reduzir a emissão de gases poluentes, a adoção de veículos elétricos e híbridos tem crescido exponencialmente. Estes veículos utilizam células eletroquímicas nos seus acumuladores de energia, o que exige a implementação de Sistemas de Gestão Térmica de Baterias (BTMS - *Battery Thermal Management System*) para garantir o seu funcionamento eficiente e seguro.

O BTMS, presente em todos os veículos elétricos e híbridos atuais, tem como função principal monitorizar e controlar a temperatura das células presentes no acumulador, procurando garantir que as células se encontram na sua faixa ideal de temperatura. Essa faixa de temperaturas garante:

- **Desempenho otimizado:** A faixa ideal de temperatura permite que as células operem na sua máxima eficiência, proporcionando maior autonomia e potência ao veículo.
- **Segurança:** O sobreaquecimento das células pode levar à sua degradação, perda de capacidade e até mesmo incêndios. O BTMS procura evitar esses cenários, monitorizando e controlando a temperatura das células de forma constante.
- **Durabilidade:** A operação dentro da faixa ideal de temperatura aumenta a vida útil das células, reduzindo custos de manutenção e substituição.

Um BTMS típico (Figura 1.1) é composto por diversos subcomponentes, incluindo:

- **Sistema de gestão de células (BMS):** Monitoriza a temperatura, tensão e corrente das células. Os dados resultantes da monitorização referida são usados no controlo dos sistemas de refrigeração/aquecimento do bloco de células, tais como bombas hidráulicas ou ventiladores.
- **Células eletroquímicas:** Responsáveis pela acumulação e fornecimento de energia a todos os sistemas do veículo.
- **Sistema de refrigeração/aquecimento:** Este grupo pode conter diversos componentes dependendo dos requisitos impostos pelo tipo de veículo e condições

ambiente. Por norma, este grupo engloba componentes como o invólucro das células, o fluido refrigerante, permutador de calor e bombas hidráulicas ou ventiladores.

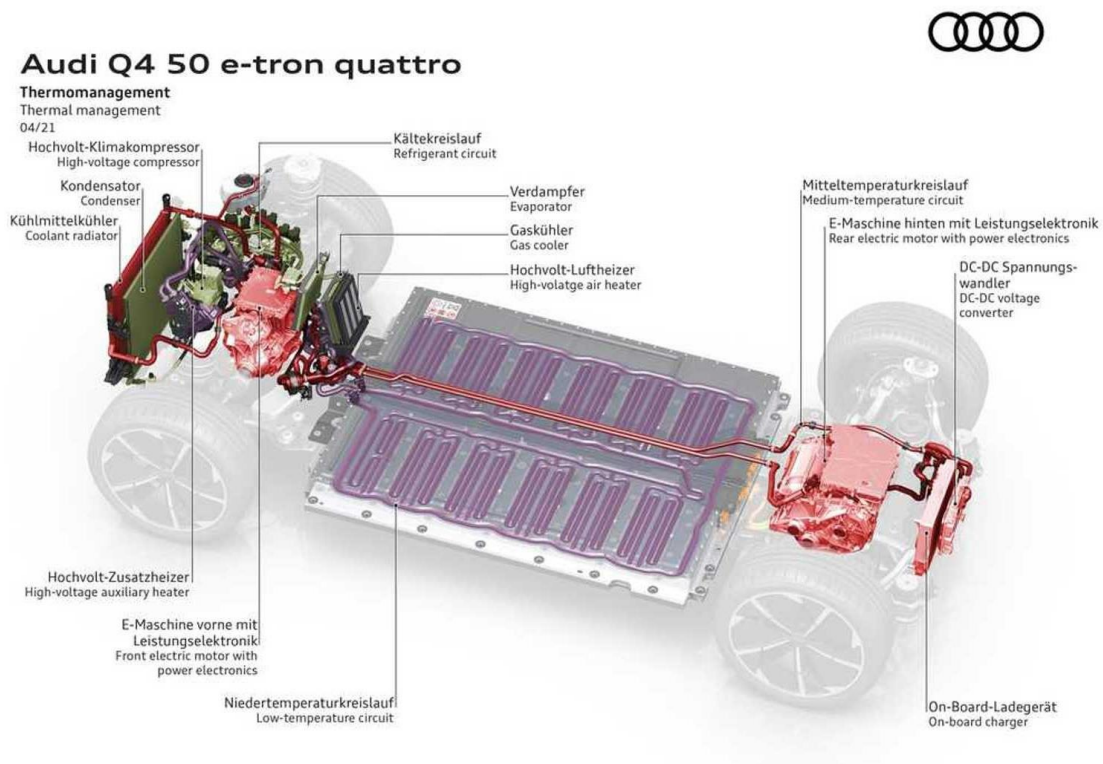


Figura 1.1 – Canais de refrigeração e outros componentes do BTMS do modelo Q4 etron do construtor Audi, adaptado de (Leichsenring, 2021)

A *Newcraft*, empresa no seio da qual o presente trabalho foi desenvolvido, e por isso doravante mencionada como empresa parceira, encontra-se atualmente a desenvolver um motociclo elétrico de competição de todo-o-terreno, que utiliza células eletroquímicas de íões de lítio como acumuladores de energia. Tratando-se de um veículo a ser desenvolvido de raiz, surgiu a necessidade de desenvolver e implementar um BTMS com capacidade de lidar com o calor que será gerado pelas referidas células de lítio. Foi neste contexto que surgiu o presente trabalho foi desenvolvido, partindo de um trabalho académico inicial, com o mesmo fim, realizado em 2023 (P. B. Silva, 2023), no qual se caracterizou a resposta térmica das células seleccionadas pela empresa para a composição das baterias.

1.1. Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é o desenvolvimento, através de simulações numéricas e ensaios experimentais, de um sistema de gestão térmica para células de iões de lítio, nomeadamente o desenvolvimento do desenho do invólucro que contém as referidas células, de modo que este permita e conduza a uma refrigeração eficiente e homogénea de cada uma das células em si encerradas.

O processo de desenvolvimento terá como fim melhorar o invólucro de células já desenvolvido pela empresa parceira, procurando manter as principais características geométricas do conceito original e introduzir novas estruturas de apoio à gestão térmica das células. O invólucro a desenvolver deverá ter a capacidade de manter a temperatura das células no seu interior abaixo dos limites de operação seguros e de forma homogénea.

Para atingir este objetivo principal, foram definidos um conjunto de objetivos parcelares que, essencialmente, passaram por:

- Simular o comportamento térmico no interior de cada célula, nomeadamente a geração de calor em função da sua taxa de carga/descarga. Para este efeito será usado o modelo MSMD (*Multi-Scale Multi physics Battery*), integrado no programa comercial de simulação do escoamento e de transmissão de calor *Ansys Fluent*, igualmente usado no presente trabalho. Serão ainda considerados os resultados obtidos em 2023 (P. B. Silva, 2023) onde foi já desenvolvido o modelo de resposta térmica da célula igualmente objeto de estudo do presente trabalho.
- Simular, via programa de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), o escoamento e as trocas de calor entre o fluido dielétrico e as células de iões de lítio, desde a entrada até à saída do invólucro, para várias configurações/desenhos do escoamento no interior deste último, desde a sua entrada até à saída.
- Desenvolver um modelo experimental para realização de testes de aferição e validação dos respetivos resultados numéricos.

1.2. Organização do relatório

Para além do enquadramento e da indicação dos objetivos do presente capítulo, o presente relatório encontra-se dividido em quatro capítulos principais:

- O Capítulo 2 contém toda a informação relativa aos fundamentos e estado da arte relevantes para o tema em estudo.
- No Capítulo 3 apresenta-se o processo de desenvolvimento e resultados do caso de referência para o presente relatório, o qual permitiu validar o processo de configuração do modelo numérico de célula eletroquímica.
- O Capítulo 4 contém o processo de desenvolvimento do invólucro final do presente trabalho, tendo presente todas as etapas de elaboração, desde o modelo inicial do invólucro e respetivos resultados numéricos, passando pelos modelos intermédios, até ao modelo final, usado para validação da geometria das estruturas de gestão térmica desenvolvidas. Este quarto capítulo contém ainda um resumo do processo de construção do módulo completo, incluindo processo de colagem de células e soldadura de células por *wirebond*.
- A análise e tratamento de resultados do caso de estudo são apresentados no Capítulo 5.
- Finalmente, no Capítulo 6 são resumidas as principais conclusões e sugeridos trabalhos futuros.

2. Fundamentos e estado da arte

Tendo em conta os temas abordados no presente trabalho, neste capítulo são resumidos os fundamentos principais sobre células eletroquímicas, transferência de calor e ainda fundamentos básicos de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD).

Adicionalmente, foi realizada e é apresentada uma revisão bibliográfica sobre as principais soluções de sistemas de gestão térmica de células eletroquímicas observadas na realidade automóvel. Decidiu-se direccionar a pesquisa do estado da arte nas soluções implementadas pelos construtores na vanguarda da implementação de células eletroquímicas em veículos ligeiros, uma vez que o bloco de células estudado no presente trabalho irá ter uma aplicação em tudo semelhante às condições deste tipo de veículos.

2.1. Fundamentos

A presente secção, onde são apresentados os principais fundamentos, encontra-se estruturada em três subsecções. A primeira, subsecção (2.1.1), teve como foco os fundamentos referentes às células eletroquímicas como sistemas de armazenamento de energia em sistemas de tração elétrica. A segunda, subsecção (2.1.2), dedica-se à apresentação de fundamentos relativos à transferência de calor. A terceira, subsecção (2.1.3), teve como foco a Dinâmica de Fluidos Computacional.

2.1.1. Células eletroquímicas

Na forma mais simplista, uma célula eletroquímica pode ser descrita como um equipamento que armazena energia química, sendo capaz de fornecer essa mesma energia sob a forma de energia elétrica. Este processo só é possível devido aos materiais usados na construção das células e à configuração física das camadas dos referidos materiais no interior das células. Apesar de existirem múltiplas combinações de materiais para construção de células, tais como lítio, magnésio e chumbo (Sanguesa et al., 2021), todas têm como base no seu funcionamento reações de oxidação/redução.

As reações de oxidação e redução ocorrem no ânodo e cátodo, respectivamente. Estes dois componentes, em conjunto com o eletrólito e o separador permeável a íons, são os componentes base da generalidade das células eletroquímicas (Figura 2.1).

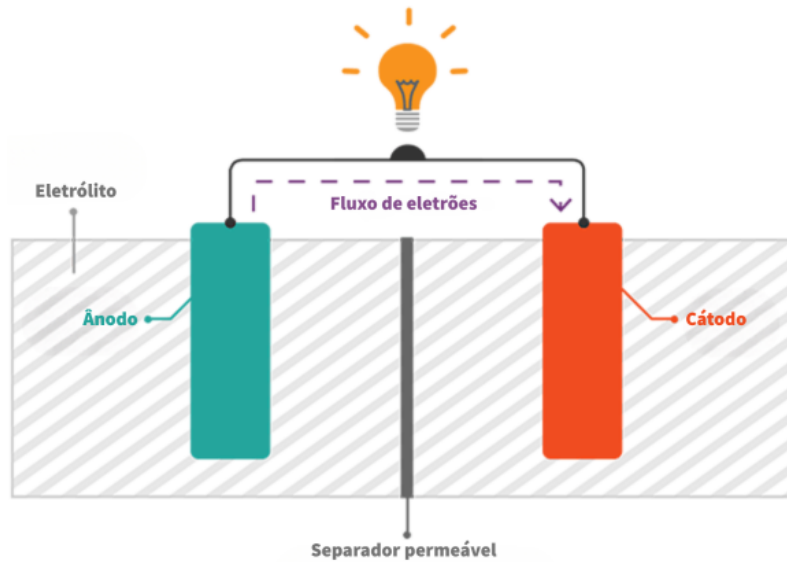


Figura 2.1 – Esquemático genérico de uma célula eletroquímica, adaptado de (Dr Bhatt et al., 2023)

Durante o processo de descarga de uma célula, as reações de oxidação que ocorrem no ânodo geram a libertação de elétrons por parte dos elementos químicos presentes no mesmo. Simultaneamente, no cátodo, ocorrem reações de redução, as quais recorrem aos elétrons que viajaram do ânodo através da carga ligada aos polos da célula para equilibrar os catiões presentes no cátodo. São estas reações químicas (Figura 2.2) que geram o fluxo de elétrons que alimenta a carga ligada aos polos da célula. Devido à resistência interna dos componentes da célula, nomeadamente do ânodo e cátodo, o fluxo de elétrons mencionado anteriormente irá gerar calor, o qual tem consequências no funcionamento da mesma. O tema da influência da temperatura no funcionamento de uma célula será explorado em maior detalhe na subsecção 2.1.1.2 do presente relatório.

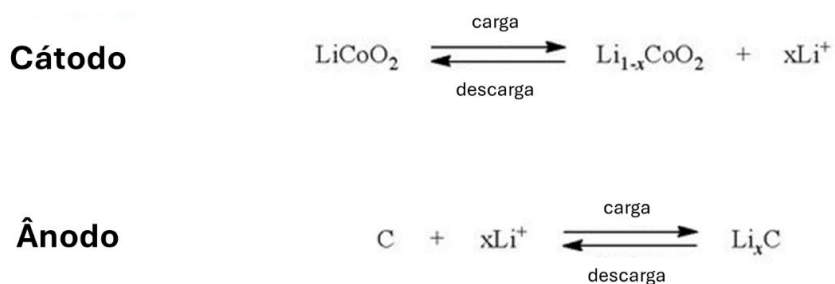


Figura 2.2 – Reações químicas de uma célula de lítio, adaptado de (Kang, 2015)

De forma a equilibrar as cargas negativas (eletrões) presentes no cátodo ou ânodo, é necessário que os cátions se desloquem entre o cátodo e ânodo no interior da célula (Samsung, 2023). O movimento interno de íons é possível devido à presença do eletrólito, o qual se pode encontrar no estado líquido ou sólido. Este movimento de íons pode originar a formação de microestruturas que podem criar uma ligação interna direta, ou curto-circuito, entre ânodo e cátodo. A formação de microestruturas cristalinas no interior da célula pode ter consequências graves para a célula. Estas consequências são apresentadas de forma mais detalhada na subsecção 2.1.1.2.

Para que a formação de microestruturas cristalinas não gere curto-circuitos internos na célula, a maioria das células com eletrólito líquido possuem ainda um separador permeável. Este separador permite apenas a passagem dos íons enquanto previne que as microestruturas cristalinas criem um circuito interno na célula. Recentemente, foram introduzidas no mercado células que possuem o seu eletrólito no estado sólido. A presença de um eletrólito sólido permite eliminar o separador permeável, uma vez que as estruturas cristalinas apenas se formam em meio líquido (Samsung, 2023).

Doravante, todos os conceitos referentes a células eletroquímicas serão referidos no contexto de células de lítio, visto que foi este o tipo de células usado no desenvolvimento do presente trabalho.

2.1.1.1. Principais características das células de lítio

Para além da sua química (por exemplo íons de lítio (LiIon) ou de fosfato de ferro-lítio (LiFePO_4)) e das suas dimensões físicas (por exemplo 21700 ou células prismáticas), cada célula pode ser caracterizada por oito aspetos principais: tensão, corrente, capacidade, estado de carga, potência, faixa de temperatura de utilização e ciclos de vida. Este grupo de características não engloba todas as características das células de lítio, representando apenas as que tiveram maior relevância no contexto do presente trabalho.

Como referido na subsecção 2.1.1, as reações químicas internas de uma célula geram uma diferença de cargas entre os polos (ânodo e cátodo) da célula. Esta diferença de cargas, ou diferença de potencial, é representada pelo valor de tensão que é possível medir aos terminais de uma célula. Quanto maior for a referida diferença, maior será o valor de tensão medido. A unidade do sistema internacional de tensão é o Volt - homenagem ao cientista Alessandro

Volta, responsável pela invenção da primeira célula eletroquímica. O valor de tensão nominal é característico de cada tipo de química de célula, sendo que para o tipo de célula que será usada no contexto do presente trabalho este valor é de 3,6 V (Molicel, 2023). Existem ainda dois outros valores de tensão importantes, nomeadamente a tensão de corte e a tensão de carga máxima. A tensão de corte indica o valor mínimo de tensão da célula, devendo garantir-se que a célula não atinge valores de tensão inferiores, sendo que o funcionamento da célula em valores de tensão inferiores ao referido pode resultar em danos permanentes à célula, podendo culminar no fim de vida útil prematuro da mesma (Menale et al., 2022). A tensão de carga máxima indica o valor de tensão máxima até ao qual a célula pode ser carregada, não devendo este valor ser ultrapassado. As consequências da carga excessiva são em tudo semelhantes às consequências da descarga excessiva, adicionando ainda o risco de autoignição da célula (Berkeley Lab, 2023). Para o tipo de célula usada no presente trabalho, os valores de tensão de corte e tensão de carga máxima são de 2,5 V e 4,2 V, respetivamente (Molicel, 2023).

O conceito de corrente (I) numa célula de lítio pode ser abordado de duas formas distintas: na perspetiva de corrente de descarga ou corrente de carga, sendo que ambas representam o fluxo de eletrões. Em documentação técnica é usado regularmente o termo *C-Rate*, em referência ao valor de corrente de carga/descarga. Este é o termo mais usado, uma vez que representa o valor de corrente consumida/fornecida em função da capacidade da célula, a qual varia com a construção e química da mesma. O tipo de célula em uso no presente trabalho apresenta um *C-Rate* máximo de descarga de 10C e 2C para carga (Molicel, 2023).

Introduz-se assim o conceito de capacidade da célula (Q), o qual é expresso em Amperes.hora, e permite conhecer a quantidade e energia dos eletrões presentes nos elétrodos (Peng et al., 2022). A célula usada no contexto do presente trabalho apresenta uma capacidade de 4,2 Ah (Molicel, 2023). Esta medida permite também estimar a quantidade de tempo que uma célula consegue fornecer energia se o consumo de corrente for contante. Considerando uma *C-Rate* constante de 4C, isso significaria que célula usada estaria a ser descarregada a uma corrente constante de 16,8 A. Tendo em conta o valor de capacidade da célula de 4,2 Ah, já mencionado, uma descarga da célula a 4C significaria que esta estaria descarregada ao fim de 15 minutos. Este valor foi obtido recorrendo às equações (2.1) e (2.2), as quais relacionam as grandezas mencionadas anteriormente.

$$C - Rate (C) = \frac{Corrente (A)}{Capacidade (Ah)} \quad (2.1)$$

$$Tempo \text{ até descarga } (h) = \frac{Capacidade (Ah)}{Corrente (A)} \quad (2.2)$$

Surge assim o conceito de estado de carga ou *SOC*, do inglês *State Of Charge*. Este conceito relaciona a quantidade de carga atual da célula com a sua capacidade total - equação (2.3).

$$SOC (\%) = \frac{Capacidade \text{ atual}(Ah)}{Capacidade \text{ total}(Ah)} * 100 \quad (2.3)$$

O conceito de potência (*P*) surge da relação entre a tensão atual da célula com a corrente adquirida/fornecida pela mesma - equação (2.4). O valor de potência exprime a quantidade de energia que a célula recebe/fornece por unidade de tempo. Essa relação também pode ser estabelecida do lado da carga, onde pode ser relacionado o valor de resistência com o valor de corrente ao quadrado de forma a obter o valor de potência.

$$Potência [W] = Tensão [V] \cdot Corrente [A] \quad (2.4)$$
$$Potência [W] = Resistência [\Omega] \cdot Corrente^2 [A]$$

A faixa de temperatura de utilização da célula é uma das variáveis com maior relevância para o presente trabalho. Tal como todas as características anteriormente mencionadas, a faixa de temperaturas também varia com o tipo de construção e química da célula. Para o tipo de célula usada no presente trabalho a faixa de temperaturas situa-se entre os 0 °C e os 45 °C para o processo de carga da célula, e entre os -45 °C e os 60 °C para o processo de descarga (Molicel, 2023). As possíveis consequências do funcionamento da célula fora desta faixa de temperatura serão exploradas em maior detalhe na subsecção 2.1.1.2.

Por fim, o conceito de ciclos de vida refere-se ao número de ciclos (cargas e descargas) realizados pela célula ao longo da sua vida útil. A contagem do número de ciclos é realizada tendo em conta a capacidade da célula, sendo contabilizado um ciclo de carga cada vez que a célula completa um ciclo de descarga e carga (Veldboom, 2021). O número de ciclos de vida úteis da célula representa uma estimativa do número de ciclos que a célula deverá ter

capacidade de realizar antes de passar a apresentar valores de capacidade inferiores a 80% da sua capacidade original.

2.1.1.2. Influência da temperatura no desempenho das células

Tal como mencionado na subsecção 2.1.1, as reações químicas que ocorrem no interior das células durante as operações de carga e descarga geram o movimento de eletrões. Este movimento de eletrões atravessa a resistência interna da célula, resultando no principal fator na geração de calor interno. Este processo, denominado de geração de calor por efeito de Joule, pertence ao grupo dos processos de geração de calor irreversível. Segundo D. Silva (D. Silva et al., 2023) os processos de geração de calor numa célula de lítio podem ser classificados em duas categorias: geração de calor reversível (geração de calor entrópico) ou geração de calor irreversível (geração de calor por efeito de Joule ou por polarização).

A geração de calor reversível resulta da alteração do nível de entropia interna da célula durante a sua carga/descarga, alteração essa que tem origem nas reações químicas. Este processo pode ser exotérmico ou endotérmico, dependendo de fatores como o *SOC* e o *C-Rate* atuais da célula. Quando comparada aos restantes mecanismos, a geração de calor reversível apresenta uma magnitude reduzida, pelo que tendencialmente é ignorada durante estudos de desempenho térmico em baterias de veículos elétricos/híbridos (Choudhari et al., 2020).

A geração de calor irreversível refere-se aos fenómenos de geração de calor observados nos elétrodos, eletrólito e coletor de corrente, tal como a geração de calor por efeito de Joule ou a geração de calor por polarização. A geração de calor irreversível representa mais de 70% do calor total gerado na célula. Este processo de geração de calor é exotérmico e está diretamente relacionado com o *C-Rate* (Choudhari et al., 2020). O calor gerado por efeito de Joule refere-se ao calor gerado devido ao fluxo de eletrões através da resistência interna da célula. O valor de resistência interna apresenta variações entre células quando estas são fabricadas e este valor apenas tende a aumentar com o envelhecimento da célula. O fenómeno de polarização refere-se à acumulação de cargas na interface entre elétrodo e eletrólito. Este acumulado de cargas limita o movimento dos íons de lítio, o que aumenta a resistência interna da célula e, por conseguinte, leva a uma maior geração de calor (D. Silva

et al., 2023). A geração de calor interno, associada às condições térmicas no exterior da célula podem ter consequências graves, as quais se encontram expostas de seguida.

A temperaturas externas elevadas, a dissipação do calor gerado no interior da célula fica comprometida. Devido à sua alta reatividade, o lítio tem tendência a entrar em combustão facilmente a temperaturas elevadas. A combinação destes fatores pode levar a que a célula entre em autocombustão, podendo mesmo explodir, libertando gases nocivos como sulfureto de hidrogénio, um fenómeno designado *thermal runaway* (Ma et al., 2018). Mesmo que o cenário anteriormente descrito não se verifique, temperaturas de célula elevadas podem resultar na redução da capacidade e vida útil da mesma. Segundo Al-Zareer et al. (Al-Zareer et al., 2019), existem estudos que apontam que, após 500 ciclos a uma temperatura de 55 °C, uma célula de lítio pode perder até 70% da sua capacidade.

Temperaturas externas muito baixas também não representam um cenário ideal, uma vez que tanto o processo de carga como descarga ficam comprometidos. Considerando que os eletrólitos da grande maioria das células de lítio se apresentam sob o estado líquido, a redução da temperatura ambiente leva a que estes aumentem a sua viscosidade. Este aumento de viscosidade é um fator limitador dos processos de carga e descarga, uma vez que esta viscosidade elevada aumenta a resistência interna da célula, o que limita o fluxo de íons de lítio. Esta redução do fluxo de íons resulta num número inferior dos mesmos que irão estar envolvidos nas reações químicas da célula, o que limita a capacidade da mesma (Zhang et al., 2022). No caso de se observarem temperaturas extremamente baixas, a solidificação do eletrólito poderá ser observada, o que pode tornar impossível a obtenção de energia elétrica a partir da célula. Estas condições poderão ainda dar origem à formação de dendrites de lítio - microestruturas cristalinas - Figura 2.3. Estas microestruturas têm a capacidade de penetrar o separador e causar curto-circuitos internos, podendo a célula ficar inutilizável, ou até ocorrer o cenário de autocombustão.

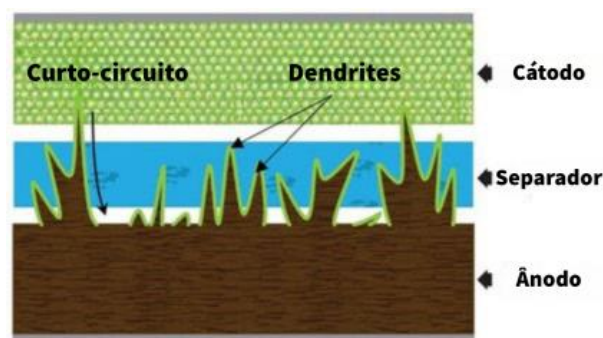


Figura 2.3 – Esquemático de formação de dendrites, adaptado de (MSE Supplies, 2019)

A Figura 2.4 apresenta ainda como, em função de várias gamas de temperatura durante o processo de carga, a célula pode só conseguir atingir cerca de 50% da sua capacidade original a temperaturas baixas. Esta perda de capacidade por parte da célula torna-se cada vez mais irreversível quantos mais ciclos de carga forem realizados a estas temperaturas baixas.

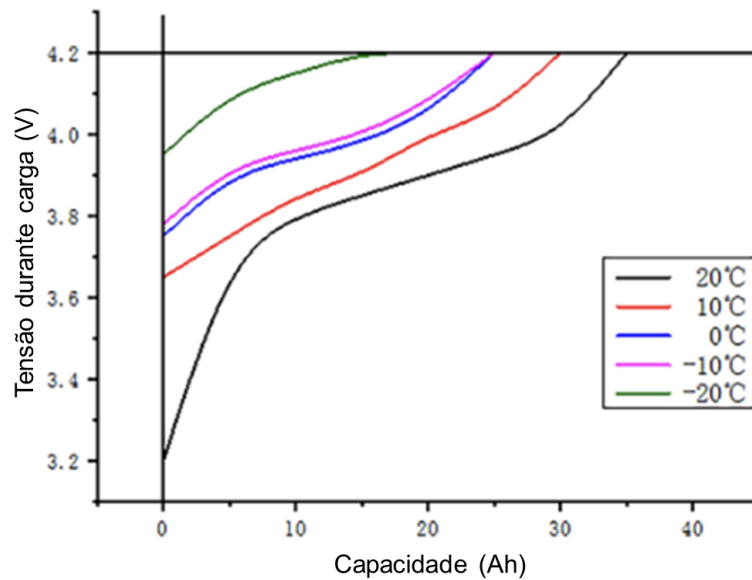


Figura 2.4 – Gráfico da relação entre capacidade e tensão aos polos da célula a diferentes temperaturas, adaptado de (Zhang et al., 2022)

2.1.1.3. Configuração física de montagens de células

Células eletroquímicas, por si só, não possuem a capacidade de alimentar sistemas como controladores e motores de tração de veículos elétricos. Os controladores e, por conseguinte, os motores elétricos que são usados nos sistemas de tração de veículos elétricos/híbridos de médio a grande porte, tendencialmente operam em regimes de tensão de 48 V, ou superior. Para além disso os regimes de carga aplicados a estes motores podem incluir picos elevados de corrente, pelo que facilmente são atingidos valores que uma só célula não tem capacidade de fornecer.

Isto significa que o sistema de armazenamento de energia de um veículo elétrico/híbrido necessita de ter capacidade de apresentar uma tensão adequada ao funcionamento do motor elétrico, bem como capacidade suficiente para que o veículo consiga atingir os valores de autonomia que o fabricante procura. Veículos híbridos operam por norma num regime de tensão nominal de 48 V, enquanto os veículos elétricos operam por norma entre os 400 V (Battery University, 2021) e os 800 V. Para além das necessidades de tensão referidas, tem

vindo a ser observado um aumento da capacidade dos conjuntos (*packs*) de células nos veículos elétricos mais recentes. Este aumento de capacidade está diretamente relacionado com a procura de maiores autonomias e com a adoção generalizada de veículos na gama dos SUV, os quais apresentam tendencialmente uma massa mais elevada. Um dos maiores blocos de células a ser comercializado atualmente encontra-se no Hummer EV, o qual apresenta uma tensão de 400 V e uma capacidade total de 615 Ah (Bell, 2023).

Tendo como exemplo a célula P42A do fabricante Molicel, que apresenta 3,7 V de tensão nominal e capacidade de 4.2 Ah, apenas um *pack* construído com múltiplas unidades deste tipo de célula apresentará características semelhantes às do Hummer EV. Para a formação destes *packs* são usadas duas estratégias: a ligação de células em série (Figura 2.5A) e a ligação de células em paralelo (Figura 2.5B).

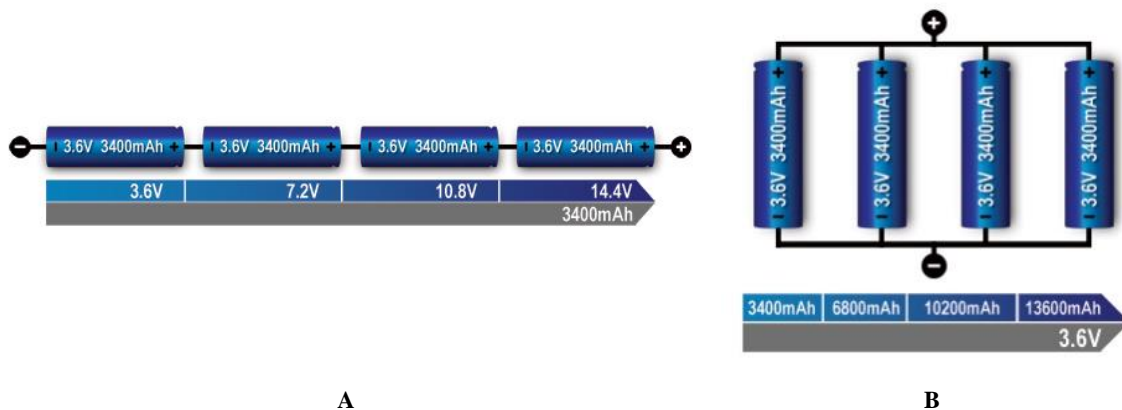


Figura 2.5 – Esquemáticos de ligação de células em série (A) e paralelo (B), adaptado de (Battery University, 2021)

A ligação de células em série (Figura 2.5A) tem como objetivo aumentar o valor de tensão medido aos polos positivo e negativo da série de células, enquanto a ligação em paralelo (Figura 2.5B) tem como objetivo aumentar a capacidade total de um grupo de células. Assim sendo, recorrendo às células P42a, seria possível construir *pack* de células equivalente ao Hummer EV usando uma configuração 109 em série e 147 em paralelo, o que resultaria num total de 16023 células. As configurações dos *packs* ou módulos são abreviadas de forma comum para XsYp, onde o valor X representa o número de células em série e o valor Y representa o número de células em paralelo. Para o caso apontado, a configuração pode ser abreviada para 109s147p.

Construir um bloco monolítico que contenha 16 mil células não é algo comum na indústria por várias razões, as quais envolvem a monitorização das células, a modularidade do sistema

e questões de segurança na montagem/manutenção do sistema. A tendência observada na indústria (Figura 2.6) baseia-se na construção de módulos de células que, por norma, apresentam tensões mais baixas para segurança dos técnicos responsáveis pela montagem/manutenção dos mesmos e geometrias que permitam a ligação dos mesmos em série ou paralelo, para assim atingir os valores finais de tensão e capacidade que o veículo necessita. Para além disso, esta estratégia permite ainda que o mesmo tipo de módulo possa ser aplicado numa gama alargada de veículos.

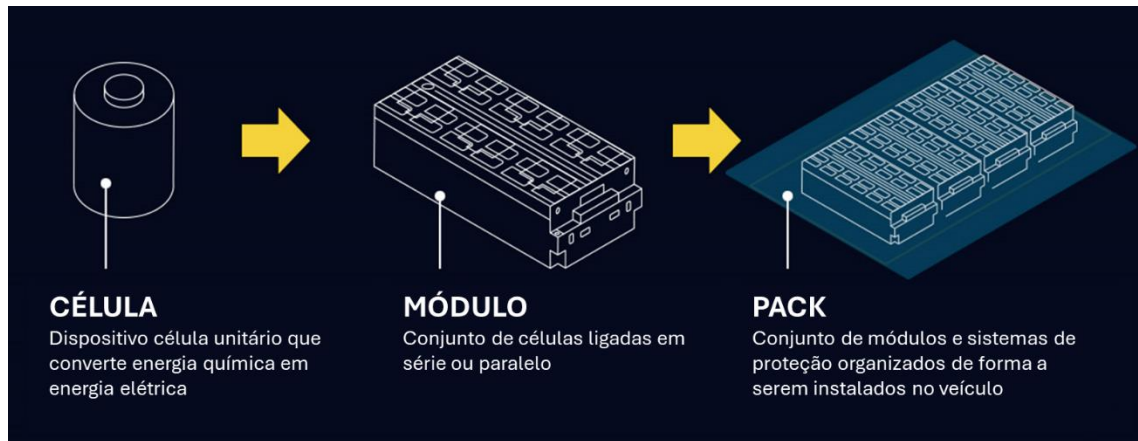


Figura 2.6 – Estrutura típica de uma bateria de um veículo elétrico/híbrido, adaptado de (Automotive Cells Company, 2022)

A ligação entre os módulos de células é um ponto onde serão observados valores elevados de corrente elétrica. Estas ligações são, por norma, realizadas por estruturas denominadas *busbar* (Figura 2.7). Estas *busbars* são usualmente construídas em cobre ou alumínio, sendo que o alumínio é o material mais observado devido ao seu custo mais reduzido.



Figura 2.7 – Exemplos de *busbars*, adaptado de (Connor Manufacturing, 2024)

Devido ao papel que as *busbars* desempenham, é necessário que estas sejam corretamente dimensionadas, de forma que tenham capacidade de lidar com os valores de corrente que as irão atravessar sem adicionarem restrições ao fluxo da mesma. Restrições ao fluxo de

corrente, ou pontos de resistência elevada no sistema, resultam na perda de eficiência do sistema em geral.

2.1.1.4. Sistemas de gestão térmica de células eletroquímicas

Com a adoção generalizada dos veículos elétricos e híbridos verificada na última década, surgiu a necessidade de gerir as temperaturas nos blocos de células deste tipo de veículo, os quais podem conter milhares de células no seu interior (Kuipers et al., 2017). Como já foi apontado na subsecção 2.1.1.2, as células de lítio apresentam uma faixa de temperaturas de funcionamento ideal, a qual promove a sua longevidade e desempenho. O aumento de temperatura para além destes limites pode levar ao fim de vida útil prematuro de parte, ou no todo, do *pack* de células, podendo resultar na já referida autocombustão do mesmo (*thermal runaway*).

De forma a controlar as temperaturas das células no interior de um módulo de células foram desenvolvidos diferentes sistemas de gestão térmica de células. Os três principais sistemas que existem na atualidade são: i) o sistema de gestão térmica com recurso ao fluxo de ar; ii) o sistema de gestão térmica com recurso a fluido; iii) o sistema de gestão térmica com recurso a um PCM (*Phase Changing Material*) (Kim et al., 2019; Zhang et al., 2022).

A grande maioria dos sistemas de gestão térmica de células com recurso a ar baseiam-se no conceito representado na Figura 2.8, onde podemos observar um sistema de gestão térmica que possui uma tomada de ar assistida por um ventilador e uma, ou mais, saídas de ar, dependendo dos requisitos impostos pela integração do sistema no veículo. Existiram ainda versões de sistemas de gestão térmica refrigerados a ar passivamente, isto é, onde o ar apenas era direcionado para o invólucro exterior das células, sendo necessário dissipar o calor gerado pelas células por condução até à superfície do invólucro exterior para só depois ser dissipado por convecção para o ar no exterior do invólucro. A aplicação deste tipo de sistema de gestão térmica a ar passivo deixou de ser observada devido a problemas observados a nível do controlo e homogeneidade da temperatura das células (ex. Nissan Leaf de primeira geração), os quais resultavam no fim de vida útil prematuro do bloco de células.

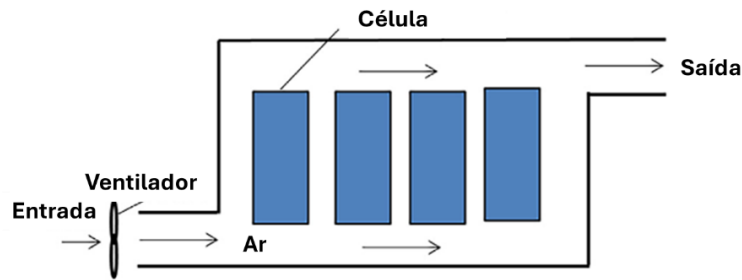


Figura 2.8 – Esquemático genérico de um sistema de gestão térmica que recorre a uma tomada de ar forçada, adaptado de (Zhang et al., 2022)

Os sistemas de gestão térmica de células com recurso a ar podem ser considerados os mais simples em termos de complexidade devido ao seu baixo número de componentes. A sua baixa complexidade significa que este tipo de solução apresenta por norma um menor custo, o que o torna num dos métodos mais usados em veículos elétricos de baixa gama ou de baixo desempenho, como os veículos citadinos. Uma vez que as condições de uso típicas deste tipo de veículo são caracterizadas por cargas mais baixas, torna-se vantajoso a adoção dos sistemas de gestão térmica de células com recurso a ar, visto apresentarem as capacidades de gestão térmicas suficientes a um custo mais reduzido. Neste tipo de sistemas é muito comum que a tomada de ar seja feita no interior do veículo, onde circula ar filtrado (Figura 2.9).

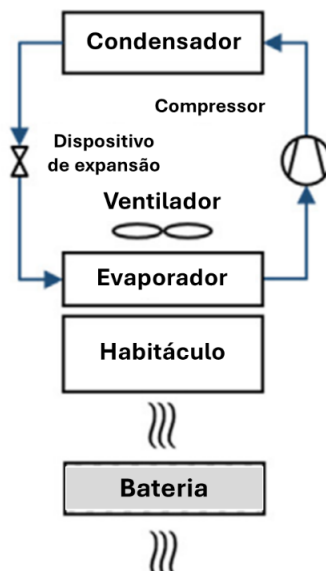


Figura 2.9 – Esquemático genérico de um sistema de gestão térmica que recorre ao ar refrigerado pelo sistema de ar condicionado, adaptado de (Kim et al., 2019)

A grande desvantagem deste tipo de sistemas resulta do facto destes sistemas recorrerem ao ar para a refrigeração das células, visto que este não é o fluido mais eficiente para esta função. Quando comparado com água ou glicol, o ar é um fluido muito menos eficaz no processo de transferência de calor, visto ter um calor específico muito baixo, da ordem de $1 \text{ J/g}\cdot\text{K}$, quando comparado aos fluidos referidos, da ordem de $4,18 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ e $3,29 \text{ J/g}\cdot\text{K}$, respetivamente. Isto significa que, para a água ou glicol, é necessário 3 a 4 vezes mais quantidade de calor para que a sua temperatura aumente um grau, o que também significa que é possível transferir uma maior quantidade de calor do corpo quente (células) para fluido de refrigeração antes de ser atingido o equilíbrio de temperaturas. Este facto leva a que num sistema de gestão térmica com recurso a ar se torne mais difícil a remoção de calor do bloco de células.

Os sistemas de gestão térmica que recorrem a um líquido (Figura 2.10) têm vindo a ser cada vez mais aplicados na indústria automóvel devido à sua capacidade térmica superior, resultante do uso de fluidos refrigerantes com base em água (Zhao et al., 2023). Estes tipos de sistemas de gestão térmica podem ser classificados em dois grupos: sistema de gestão térmica com fluido em contacto indireto, ou sistema de gestão térmica com fluido em contacto direto - sistema de gestão térmica de imersão líquida.

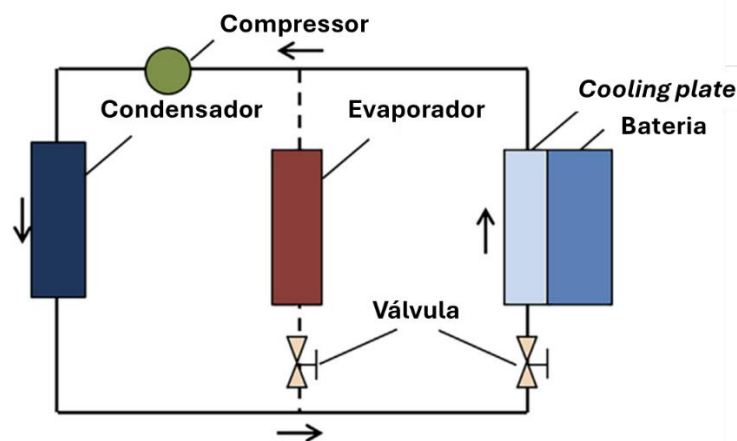


Figura 2.10 – Esquemático genérico de um sistema de gestão térmica com recurso a um fluido, adaptado de (Zhang et al., 2022)

Atualmente os sistemas de gestão térmica com fluido em contacto indireto (Figura 2.11) são o tipo de sistemas com maior taxa de aplicação dentro do grupo de sistemas de gestão térmica que recorrem a um fluido (Zhang et al., 2022; Zhao et al., 2023). Isto deve-se ao facto de estes sistemas apresentarem uma capacidade de remoção de calor superior aos sistemas de

gestão térmica de com recurso a ar, enquanto simultaneamente são menos complexos que os sistemas de gestão térmica por imersão líquida.

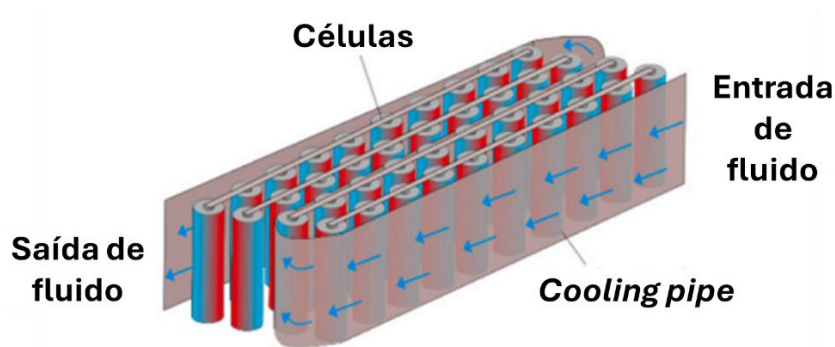


Figura 2.11 – Esquemático genérico de um sistema de gestão térmica com recurso a fluido e *cooling pipe*, adaptado de (Kim et al., 2019)

No entanto, devido às suas formas de aplicação típicas, tais como *cooling plate* ou *cooling pipe* (Figura 2.11), o processo de transferência de calor deste tipo de solução irá ser sempre menos eficiente que uma solução de gestão térmica por imersão líquida. Nos sistemas de gestão térmica com fluido em contacto indireto é necessário um meio adicional na transferência de calor, meio para o qual o calor removido da célula é transferido por condução e só depois transferido por convecção para o fluido de refrigeração. Este facto, em associação com o volume reduzido de fluido que se irá encontrar em proximidade com as células significa que, em termos de dissipação de calor e uniformidade de temperaturas no bloco de células, os sistemas de gestão térmica com fluido em contacto indireto possuem tendência a apresentar pior desempenho que um sistema de gestão térmica de imersão líquida.

Os sistemas de gestão térmica de imersão líquida representam um tipo de tecnologia que tem vindo a ser cada vez mais aplicado na indústria automóvel, especialmente em veículos de alto desempenho. Na sua forma mais simples, um sistema deste tipo consiste na imersão das células em fluido dielétrico não condutor. Os fluidos dielétricos incluem óleos à base de hidrocarbonetos, glicol ou éster. Este método de gestão térmica tem o potencial de possibilitar a melhor homogeneidade de temperaturas num bloco de células de entre todos os métodos de gestão térmica já referidos. O contacto direto entre o fluido e as células proporciona um meio de transferência de calor de alta capacidade térmica e, simultaneamente, reduz a resistência térmica de contacto, presente em valores mais elevados nos sistemas de gestão térmica com fluido em contacto indireto. Alguns destes sistemas

possuem ainda a capacidade de promover a supressão de situações de *thermal runaway*, uma vez que alguns dos fluidos dielétricos presentes no mercado possuem a capacidade de atuar como retardantes de chama, o que aumenta o grau de segurança do módulo de células. Existem diferentes métodos de implementação de um sistema de gestão térmica de imersão líquida, os quais dependem do nível de imersão, do tipo de escoamento e do estado do fluido. Exemplos de aplicações distintas de sistemas de gestão térmica de imersão líquida encontram-se expostas na Figura 2.12 (Roe et al., 2022).

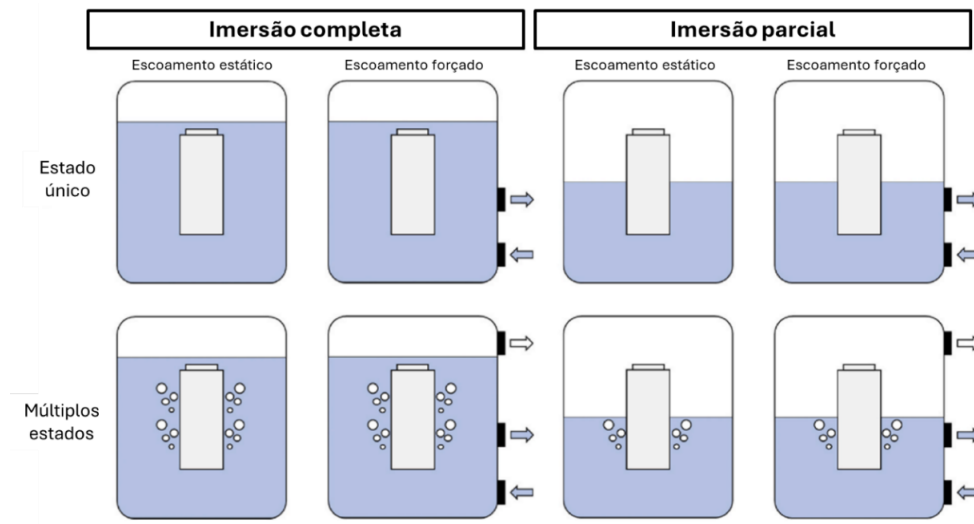


Figura 2.12 – Diferentes tipos de aplicação de um sistema de gestão térmica de imersão líquida, adaptado de (Roe et al., 2022)

Sistemas de gestão térmica de imersão líquida com escoamento forçado incluem ainda, usualmente, componentes como bombas hidráulicas e permutadores de calor, os quais permitem maximizar a remoção de calor das células, mas também aumentam a complexidade e o custo destes sistemas.

Por fim existem sistemas de gestão térmica que recorrem a materiais com mudança de fase (PCM - *Phase Changing Materials*). A aplicação deste tipo de materiais na gestão térmica de *packs* de células resulta da capacidade de armazenar/libertar calor durante a troca de fase que este tipo de materiais possui. Em qualquer material, quando ocorre a transição de fase existe a libertação ou absorção de calor latente. O que diferencia os PCM dos restantes materiais é a sua capacidade superior de absorção/libertação de calor latente durante estas transições de fase (Concept Group, 2023). Como tal, estes materiais possuem um enorme potencial neste tipo de aplicação, uma vez que soluções que recorram a este tipo de materiais poderão permitir a eliminação de componentes de apoio presentes nos sistemas de gestão

térmica já referidos, como os permutadores de calor e ventiladores. Isto deve-se ao facto de que os PCM possibilitam a manutenção da temperatura do bloco de células através do dimensionamento/seleção de PCM ideal para as condições de funcionamento do bloco de células.

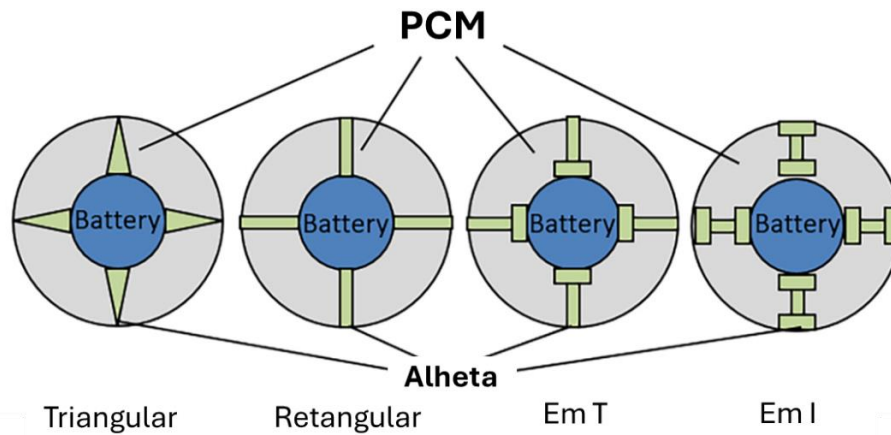


Figura 2.13 – Tipos de aplicação de PCM em sistemas de gestão térmica de células, adaptado de (Zhang et al., 2022)

Estes sistemas podem ter diversas configurações (Figura 2.13), no entanto todas elas aparentam basear-se no conceito da aplicação do PCM em contacto direto com as células do bloco, podendo existir auxílio da manutenção da temperatura alvo por parte de fluidos (ar, água, entre outros) (Zhang et al., 2022). Apesar da aplicação deste tipo de materiais na gestão térmica de células não ser um conceito recente, este tipo de sistemas de gestão térmica ainda necessita de maior desenvolvimento para que a sua aplicação seja viável em sistemas de armazenamento de energia de tração em veículos elétricos/híbridos (Kannan et al., 2021).

2.1.2. Transferência de calor

Visto que no presente trabalho serão abordados e usados vários conceitos relacionados com a gestão térmica de um bloco de células de lítio, será pertinente que estejam expostos no presente documento alguns conceitos básicos de transferência de calor. Assim sendo, a presente subsecção é dedicada à apresentação destes conceitos, tendo sido essencialmente baseada no livro *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* da autoria de Incropera (Incropera et al., 2007).

Pela sua definição, transferência de calor engloba todo o fluxo de energia entre corpos devido a diferenças de temperatura entre os mesmos (Incropera et al., 2007). Quando se observa uma diferença de temperatura entre dois corpos/materiais em contacto, ocorre sempre

transferência de calor. Este fenômeno físico pode ocorrer de três modos distintos: condução, convecção e radiação, tal como se encontra representado na Figura 2.14.

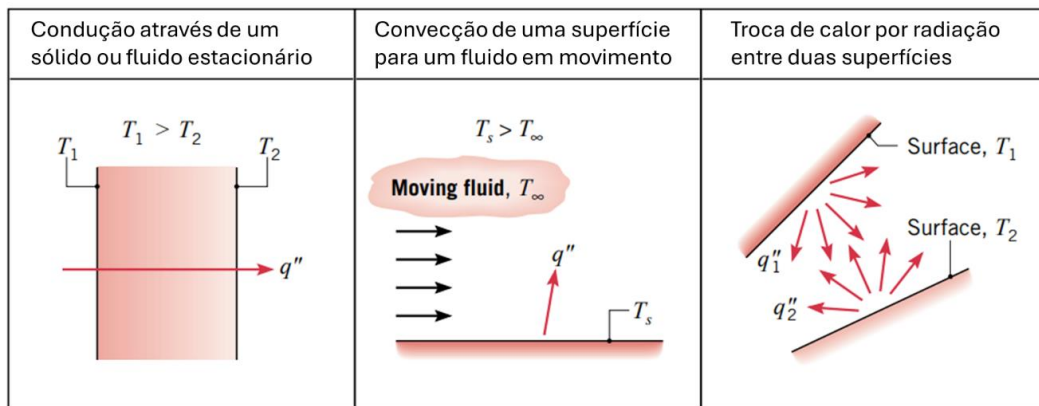


Figura 2.14 – Tipos de transferência de calor, adaptado de (Incropera et al., 2007)

2.1.2.1. Condução

A palavra condução deve de imediato sugerir conceitos como atividade molecular/atômica, uma vez que são processos a este nível que sustentam este modo de transferência de calor (Incropera et al., 2007). A condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas com maior carga energética para as de menor carga energética.

O conceito de condução torna-se mais claro tomando como exemplo um gás, contido entre duas paredes de temperaturas distintas, onde irá existir um gradiente de temperaturas, mas o restante sistema se encontra estático (Figura 2.15). Neste caso é possível estabelecer uma relação entre a temperatura em qualquer ponto com o nível de energia da molécula de gás presente no referido ponto. Este nível de energia interna das moléculas do gás está diretamente relacionado com a translação das moléculas bem como com a rotação e vibração interna das mesmas.

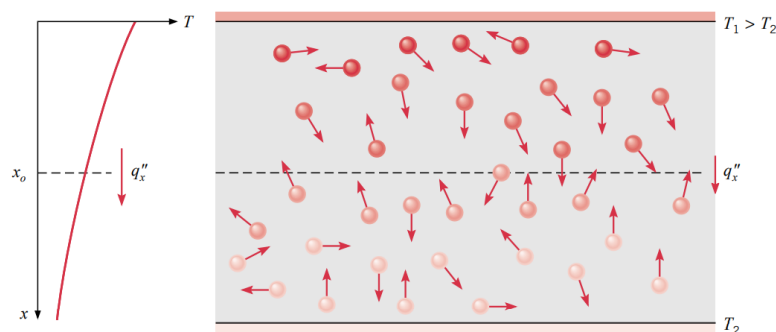


Figura 2.15 – Esquemático de transferência de calor por convecção num gás contido entre duas superfícies a temperaturas distintas, adaptado de (Incropera et al., 2007)

Esta maior concentração de energia na zona de temperatura mais elevada indica desde logo maior número de colisões entre as moléculas, o que gera transferência de energia das moléculas com maior carga de energia para as de menor carga. Na presença de um gradiente de temperatura, isto irá resultar na transferência de energia por condução na direção da zona de menor temperatura (Incropera et al., 2007). Tal como pode ser observado na Figura 2.15, existe um fluxo constante de moléculas que atravessa o eixo x_0 , devido ao movimento aleatório das mesmas. Considerando a condição anteriormente exposta, onde as moléculas acima deste eixo apresentam sempre uma temperatura mais elevada que as moléculas abaixo deste eixo, o fluxo de moléculas da zona de maior temperatura para a zona de menor temperatura gera um fluxo de energia/calor na direção positiva do eixo x (Figura 2.15). As colisões entre moléculas irão apenas aumentar a taxa de transferência de energia.

Esta lógica pode ser aplicada a elementos no estado líquido ou sólido, uma vez que nestes casos a grande distinção estará na distância entre as moléculas do elemento. Tal como seria de esperar, a maior proximidade das moléculas observada nos elementos líquidos e sólidos irá originar interações de maior intensidade e frequência, quando comparado a um elemento gasoso. Assim sendo, em regra geral, a condução térmica é mais intensa em elementos sólidos do que líquidos e mais intensa em líquidos do que gases.

É possível quantificar o fluxo de calor por condução recorrendo à lei de Fourier - equação (2.5) - que quantifica o fluxo de calor/energia por condução num caso unidimensional, onde existe um diferencial de temperaturas (dT) ao longo de um material de espessura (dx).

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

O fluxo de calor q''_x (W/m) representa a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular à direção do fluxo, sendo esse mesmo fluxo proporcional ao gradiente de temperaturas (dT/dx) na direção x . O parâmetro k é uma propriedade de transporte, característica do tipo de material do meio em análise, e é denominada condutividade térmica (W/m·K). O sinal negativo que precede este parâmetro resulta do facto de que o fluxo de calor ocorre na direção da temperatura mais elevada para a mais baixa (Incropera et al., 2007).

Este tipo de transferência de calor será observado, no contexto do presente trabalho, maioritariamente nas camadas internas das células de lítio, uma vez que internamente estas células são compostas de camadas intercaladas de ânodo, eletrólito e cátodo. Estas camadas não apresentam movimento entre si, como tal todo o calor gerado internamente pelo funcionamento da célula irá fluir para o exterior da mesma devido ao efeito de condução.

2.1.2.2. Convecção

A transferência de calor através de convecção é realizada por dois mecanismos: através do movimento aleatório das moléculas do elemento em estudo (difusão) e através do movimento macroscópico de um fluido (Incropera et al., 2007). O referido movimento macroscópico pressupõe, desde logo, que irá ocorrer o movimento coletivo de largos números de moléculas. As moléculas nesse agregado coletivo mantêm o movimento aleatório entre si, o que resulta numa taxa de transferência de energia amplificada, uma vez que ambos os referidos mecanismos de transferência de calor ocorrem em simultâneo. De forma mais concreta, o termo convecção designa o processo de transferência de calor que ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície estática quando ambos se encontram a temperaturas distintas.

Tomando como exemplo a situação esquematizada na Figura 2.16, onde temos o escoamento de um fluido sobre uma superfície aquecida. Uma consequência do escoamento de um fluido sobre uma superfície é a geração de uma região no fluido onde a velocidade do mesmo varia desde o valor zero, no ponto do fluido imediatamente acima da superfície, até ao valor da velocidade do escoamento onde este já não é afetado pela presença da superfície. Esta camada é denominada de camada limite e será discutida em maior detalhe na subsecção 2.1.3.4. Além disso, irá ocorrer ainda a formação de uma camada limite térmica, na qual a temperatura das moléculas na posição $y = 0$ será igual à temperatura da superfície (T_s), evoluindo de forma gradual até atingir a temperatura média do escoamento (T_∞). Por norma o perfil de variação térmica não apresenta a mesma evolução que o perfil de velocidades e podemos afirmar que ocorre transferência de calor por convecção desde que se verifique que $T_s \neq T_\infty$.

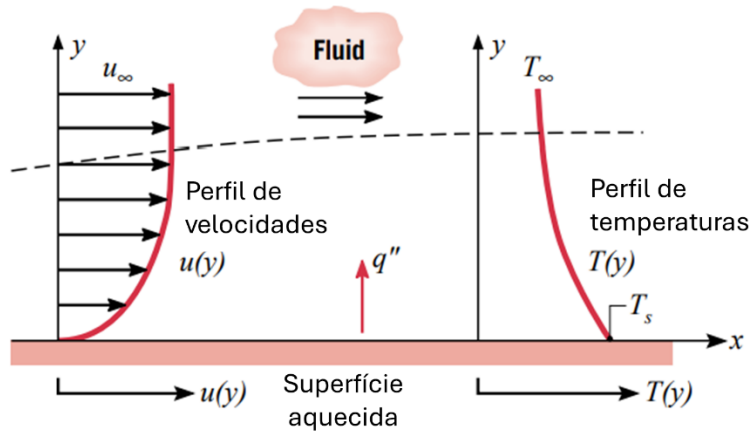


Figura 2.16 – Influência da superfície estática e aquecida nos perfis de velocidade e temperatura do escoamento, adaptado de (Incropera et al., 2007)

Conforme já referido, a transferência de calor por convecção é realizada pelo movimento relativo entre moléculas do fluido bem como o movimento macroscópico entre o escoamento do fluido sobre uma superfície. A velocidades de escoamento mais baixas o movimento relativo entre moléculas do fluido representa a maioria da taxa de transferência de calor na periferia da interface escoamento/fluido, sendo que no ponto imediatamente após a superfície ($y = 0$) é possível afirmar que toda a transferência de calor ocorre através deste mecanismo. A contribuição do movimento macroscópico do escoamento para a taxa de transferência de calor tem origem devido ao facto de que a camada limite térmica aumenta de tamanho na direção positiva do eixo x (Figura 2.16). Na realidade o calor transmitido para esta camada irá ser varrido para jusante no escoamento onde, devido ao referido efeito de crescimento da camada limite térmica, este será transmitido às moléculas fora da camada limite térmica.

A transferência de calor por convecção pode ainda ser classificada de acordo com a natureza do escoamento. O termo convecção forçada é aplicada à transferência de calor por convecção para um escoamento gerado por meios externos, como uma bomba ou ventilador. Este método é muito comum na gestão térmica de componentes eletrónicos, tal como se encontra representado na Figura 2.17a. Em oposição, convecção livre ou natural refere-se à transmissão de calor por convecção onde o escoamento do fluido é gerado por disparidades na densidade do fluido devido a variações de temperatura no mesmo. Tomando o exemplo anteriormente referido da gestão térmica de componentes eletrónicos. Se a orientação dos mesmos for vertical (Figura 2.17b) o ar estático que estiver em contacto com os componentes

irá aumentar de temperatura, o que fará a sua densidade ir diminuir. Esta redução de densidade irá gerar o fluxo de ar e, por conseguinte, a convecção natural.

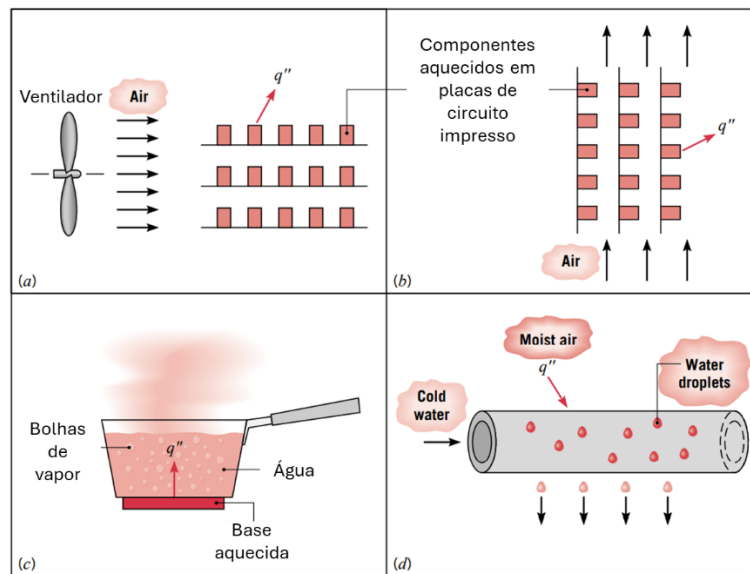


Figura 2.17 – Tipos de transferência de calor por convecção, adaptado de (Incropera et al., 2007)

Tipicamente a energia que é transferida num processo de convecção é a energia sensível, ou térmica interna, do fluido. Contudo, existem processos de convecção para os quais ocorre ainda a transferência de energia latente. Esta energia latente é por norma associada à mudança de fase de líquido para gás por parte do fluido. Dois processos muito comuns e de interesse são a evaporação e a condensação. Por exemplo, a transferência de calor por convecção pode ser gerada através do movimento induzido por moléculas de vapor de um fluido geradas no fundo de um recipiente de água a ferver (Figura 2.17c) ou pela condensação de moléculas de vapor de água na superfície externa de um tubo que transporta água fria (Figura 2.17d).

Não obstante, a equação (2.6) é a indicada para obter o fluxo de calor por convecção, independentemente do processo que origina a transferência de energia. Nesta equação q'' representa o fluxo de calor por convecção em W/m^2 , o qual é proporcional à diferença de temperaturas entre a superfície (T_s) e o fluido (T_∞), respetivamente. Esta equação também representa a lei de Newton para a convecção, onde o parâmetro h , medido em $W/m^2 \cdot K$, é denominado coeficiente de transferência de calor por convecção. Este parâmetro depende das condições presentes na camada limite térmica, as quais são afetadas por parâmetros como a geometria da superfície, o tipo de origem do escoamento, entre outras propriedades termodinâmicas e de transporte.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.6)$$

A convecção irá ser o principal método envolvido na transferência de calor no caso em estudo do presente trabalho, uma vez que este consiste num bloco de células imersas em fluido refrigerante. Aspetos como o caudal do escoamento bem como a turbulência do mesmo deverão ter impacto significativo na eficiência global do processo de gestão térmica das células do bloco.

2.1.2.3. Radiação

A radiação é um processo de transferência de calor em que “...energia é emitida por matéria que se encontra a uma temperatura diferente de zero” (Incropera et al., 2007). A energia emitida sobre a forma de radiação pode ter origem num elemento em qualquer estado físico, sendo a referida emissão atribuída às alterações nas configurações dos eletrões dos átomos e/ou moléculas do elemento em análise. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas (também designadas por fotões), não sendo necessário a presença de atmosfera, ou qualquer outro meio, para o referido transporte, contrariamente aos processos de condução e convecção.

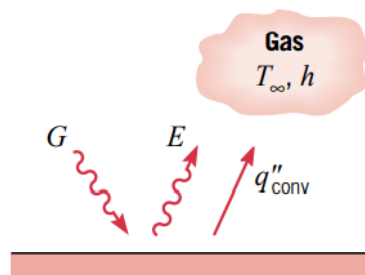


Figura 2.18 – Esquemático de transferência de calor por radiação, adaptado de (Incropera et al., 2007)

Tomando como exemplo a situação representada na Figura 2.18, onde temos transferência de calor por radiação. Neste caso, a radiação emitida pela superfície tem origem na energia térmica da matéria confinada pela superfície representada. O fluxo de calor libertado por unidade de área é denominado por potência emissiva (E_b) e é medida em W/m^2 . Existe um limite para a potência emissiva, o qual é determinado pela lei de *Stefan-Boltzmann* (2.7), onde T_s representa a temperatura absoluta da superfície em graus Kelvin e σ é a constante

de *Stefan-Boltzmann* ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$). No contexto da lei de *Stefan-Boltzmann* a superfície considerada é designada um radiador ideal ou um corpo negro.

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.7)$$

Na realidade a energia emitida por uma superfície real é menor que a emitida por um corpo negro e, como tal, o fluxo de calor de uma superfície real por radiação é expresso pela equação (2.8) onde ε representa a propriedade radiativa, característica de cada superfície, denominada emissividade. O valor de ε varia entre zero e um e representa, em termos relativos, o nível de eficiência de emissão de energia por radiação de uma superfície em relação ao corpo negro. O valor de ε é altamente influenciado por fatores como o material e acabamento da superfície.

$$E_b = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.8)$$

A transferência de calor por radiação pode acontecer no sentido inverso, isto é, do meio para a superfície. A radiação poderá ter origem numa fonte como o sol ou outras superfícies, sob as quais a superfície em análise está exposta. Independentemente da fonte de energia, a taxa com que a radiação incide sob uma unidade de área de superfície é designada irradiação (G) (Figura 2.18). A irradiação pode ser absorvida em todo ou em parte por uma determinada superfície, resultando num aumento da energia térmica do material da superfície. A taxa com que energia sob a forma de radiação é absorvida por unidade de área de superfície pode ser determinada recorrendo à equação (2.9).

$$G_{abs} = \alpha G \quad (2.9)$$

A propriedade α , ou absorptividade da superfície, pode apresentar um valor entre zero e um. Caso α tenha um valor inferior a um e a superfície for opaca, parte da irradiação é refletida. Caso a superfície seja semitransparente, parte da irradiação poderá ser emitida.

De todos os métodos de transferência de calor já referidos, será expectável que a radiação tenha o menor impacto na intensidade de fluxo de calor global do sistema em análise.

2.1.3. Dinâmica de Fluidos Computacional

Uma das ferramentas fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho foi a simulação numérica de escoamentos (CFD), com transmissão de calor, bem como do interior das próprias células de íões de lítio.

Assim, na subsecção seguinte serão apresentados alguns aspetos fundamentais no contexto de uma análise de dinâmica de fluidos computacional. A presente subsecção contém um resumo do procedimento de cálculo numérico realizado no âmbito do presente trabalho, tendo-se recorrido a um programa de CFD comercial (*Ansys Fluent*). Os subcapítulos 2.1.3.1, 2.1.3.2, 2.1.3.3 e 2.1.3.4 foram adaptados de (Martinho, 2024), enquanto que o subcapítulo 2.1.3.5, referente ao modelo de célula, foi adaptado de (Ansys Inc., 2021).

Tal como o próprio nome sugere, a Dinâmica de Fluidos Computacional calcula, de forma numérica, os campos de velocidades, pressão e temperaturas envolvidos no escoamento de um fluido. A razão pela qual a solução obtida a partir destes programas é apenas numérica, e não exata, encontra-se relacionada com o facto de que, para que fosse possível obter os resultados exatos dos perfis referidos, seria necessário possuir a capacidade de resolução das equações diferenciais de Navier-Stokes. Até à data, as equações referidas não possuem solução exata, nomeadamente para casos reais de engenharia, envolvendo turbulência, como é o caso do presente estudo.

Os códigos numéricos de CFD têm na base a resolução das equações de conservação de massa, de quantidade de movimento e, se o problema envolver trocas de calor, de conservação de energia.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial (\rho \cdot \vec{v})}{\partial t} = -\vec{\nabla} p + \rho \cdot \vec{g} + \vec{\nabla} \tau \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial (\rho \cdot U)}{\partial t} + p \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) = \nabla \cdot (K \cdot \nabla T) + \Phi \quad (2.12)$$

onde:

- \vec{v} representa o vetor velocidade, o qual pode ser decomposto em u , v e w segundo as coordenadas x , y e z , respetivamente, no instante t .
- p representa o valor de pressão do fluido nas coordenadas x , y e z e no instante t .
- ρ representa a densidade do fluido nas coordenadas x , y e z e no instante t .
- U representa o valor de energia interna do fluido.
- T representa o valor de temperatura do fluido nas coordenadas x , y e z e no instante t .
- Φ representa a função de dissipação viscosa de calor.

A equação (2.10) – lei de conservação de massa - baseia-se na continuidade espacial e temporal da matéria. A equação (2.11), lei da conservação de quantidade de movimento, baseia-se na segunda lei de Newton. Por fim, a equação (2.12), de conservação de energia, baseia-se na primeira Lei da Termodinâmica, a qual define a variação da energia de um determinado sistema como o diferencial entre a energia adquirida e a energia libertada pelo referido sistema.

Recorrendo às equações (2.10), (2.11) e (2.12) é possível relacionar as variáveis dependentes, nomeadamente (\vec{v} , p e T) em função das quatro variáveis independentes (x , y , z e t),

De forma a ser possível obter um sistema de equações completo será ainda necessário adicionar duas equações, designadas de equações de estado, as quais relacionam a variação da massa volúmica do fluido (2.13) e a variação da energia interna do fluido (2.14) em função da sua pressão e temperatura.

$$\rho = \rho(p, T) \quad (2.13)$$

$$U = U(p, T) \quad (2.14)$$

Às equações diferenciais parciais, de segunda ordem, não lineares, resultantes das equações (2.10) – e (2.11), com os termos resultantes das tensões normais e de corte substituídos pelos desenvolvimentos realizados pelos autores Navier e Stokes, são por isso usualmente

designadas de equações de Navier-Stokes e foram derivadas no início do século XIX. Como já havia sido referido, até ao momento é apenas possível obter uma solução exata para este sistema de equações para escoamentos simples e em condições ideais. Como a vasta maioria dos problemas de engenharia compreendem situações onde o escoamento em análise se encontra fora destes parâmetros, será necessário proceder à resolução numérica (aproximada) do referido sistema de equações. O método de discretização das equações de conservação, modelos de turbulência e tratamento do escoamento junto a superfícies serão apresentados nas subsecções seguintes.

2.1.3.1. Discretização das equações de conservação

Dependendo do modelo numérico usado na resolução, existem diferentes abordagens para a discretização e resolução das equações de conservação. No caso do programa usado no presente trabalho (*Ansys Fluent*) é usado o método dos Elementos Finitos, onde a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões, sendo o resultado do referido processo de divisão uma malha ou grelha do domínio de cálculo. Os elementos para o volume em análise (passagens de fluido de refrigeração no interior do bloco de células) serão tridimensionais e serão organizados de forma não estruturada, existindo elementos com diferentes geometrias. A figura seguinte ilustra o exemplo simplificado para ilustrar o método de discretização das equações referidas na secção 2.1.3, através das respetivas equações a seguir apresentadas.

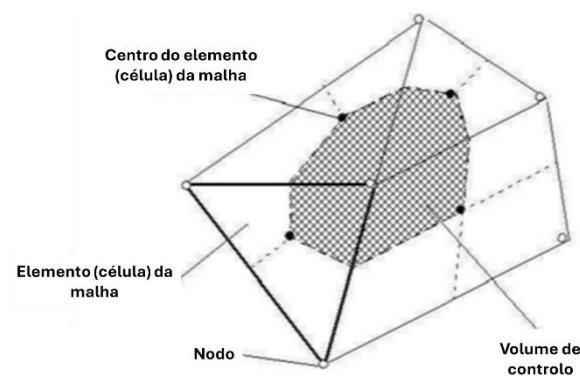


Figura 2.19 – Exemplo de malha bidimensional, adaptado de (Martinho, 2024)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \cdot (\rho \cdot u_j) = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_j \cdot u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho \cdot g_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{eff} \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot \varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_j \cdot \varphi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{eff} \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) \right) + S_\varphi \quad (2.17)$$

As equações (2.15), (2.16) e (2.17) expressam, respetivamente, as equações de conservação de massa, momentum e uma outra variável escalar geral (φ) em coordenadas cartesianas, tal como ilustrado na Figura 2.19, onde:

- u representa a componente da velocidade na direção i ;
- μ_{eff} representa a viscosidade efetiva;
- Γ_{eff} representa a difusividade efetiva da variável escalar φ ;
- S_φ representa a fonte da variável escalar φ .

A integração das equações (2.15), (2.16) e (2.17) para cada volume de controlo/elemento de malha é conseguida aplicando o Teorema de Gauss:

$$\iiint_{Vol} \nabla \cdot \varphi \cdot \partial V = \iint_S \varphi \cdot \partial S \quad (2.18)$$

A aplicação do teorema (2.18) resulta nas equações:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \int_{Vol} \rho \cdot \partial V + \int_S \rho \cdot u_j \cdot \partial n_j = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{Vol} \rho \cdot u_i \cdot \partial V + \int_S \rho \cdot u_j \cdot u_i \cdot \partial n_j = - \int_S \rho \cdot \partial n_j + \int_S \mu_{eff} \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \cdot \partial n_j + \int_{Vol} S_{u_i} \cdot \partial V \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{Vol} \rho \cdot \varphi \cdot \partial V + \int_S \rho \cdot u_j \cdot \varphi \cdot \partial n_j = \int_S \rho \cdot \partial n_j + \int_S \Gamma_{eff} \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) \cdot \partial n_j + \int_{Vol} S_\varphi \cdot \partial V \quad (2.21)$$

Nas equações (2.19), (2.20) e (2.21), agora integradas, temos:

- Vol que representa o volume do elemento de integração;
- S que representa a superfície do elemento de integração;
- ∂n_j que representa as componentes cartesianas do vetor norma da superfície j .

Nas referidas equações os integrais ao longo do volume representam termos fonte ou de acumulação das respetivas variáveis. Os integrais ao longo das superfícies representam a soma dos fluxos das respetivas variáveis. Como tal, o passo seguinte da resolução numérica passará pela discretização dos volumes e superfícies. Para efeitos de ilustração deste passo será usado o elemento de malha genérico, representado na Figura 2.20.

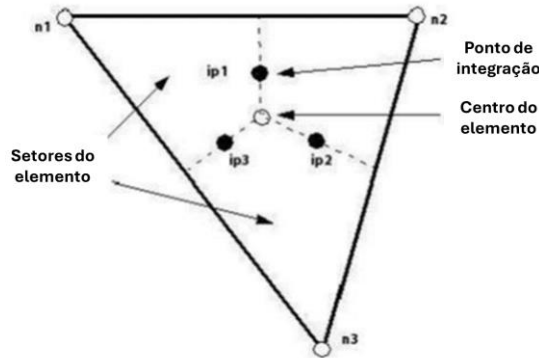


Figura 2.20 – Exemplo de um elemento de malha bidimensional, adaptado de (Martinho, 2024)

Os integrais ao longo do volume de controlo de cada elemento são discretizados dentro de cada setor do respetivo elemento e acumulados no volume de controlo a que esse setor pertence. Os integrais ao longo das superfícies são discretizados nos pontos adjacentes (ip1, ip2 e ip3 da Figura 2.20), localizados no centro de cada segmento da superfície, e depois distribuídos para os volumes de controlo adjacentes. Os integrais ao longo da superfície dos elementos são localmente conservativos, uma vez que o seu valor é simétrico para volumes de controlo adjacentes ao ponto de integração. De acordo com esta discretização, as equações de conservação de massa, momentum e grandeza escalar resultam nas equações seguintes.

$$Vol \cdot \left(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} = 0 \quad (2.22)$$

$$Vol \cdot \left(\frac{\rho \cdot u_i - \rho^0 \cdot u_i^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} \cdot (u_i)_{ip} = \sum_{ip} (p \cdot \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \left(\mu_{eff} \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \cdot \Delta n_j \right)_{ip} + S_{\bar{u}_i} \cdot Vol \quad (2.23)$$

$$Vol \cdot \left(\frac{\rho \cdot \varphi - \rho^0 \cdot \varphi^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} \cdot \varphi_{ip} = \sum_{ip} \left(\Gamma_{eff} \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) \cdot \Delta n_j \right)_{ip} + S_{\varphi} \cdot Vol \quad (2.24)$$

Nas equações (2.22), (2.23) e (2.24), agora discretizadas, temos:

- \dot{m}_{ip} que representa a simplificação de $(\rho \cdot u_j \cdot \Delta n_j)_{ip}$;
- O índice superior ⁰ que representa o valor da variável no instante imediatamente anterior ao instante atual, após Δt de cálculo.

As equações (2.22), (2.23) e (2.24) são assim as equações genéricas a que o programa *Fluent* recorre para obter os valores relevantes numa análise de escoamento de fluidos, tais como perfis de pressão velocidade e temperatura do fluido em análise.

2.1.3.2. Resolução das equações discretizadas e erros

O conjunto de equações algébricas lineares resultantes da aplicação do método dos volumes de controlo pode ser escrito da seguinte forma compacta:

$$\sum_{nb_i} a_i^{nb} \cdot \varphi_i^{nb} = b_i \quad (2.25)$$

Na equação (2.25) temos:

- φ que representa a solução da respetiva variável;
- a que representa os coeficientes da equação;
- b que representa o termo independente;
- i que representa o número identificador dos nodos vizinhos, que inclui o coeficiente central que multiplica a solução (φ) no nodo i .

Os nodos numa malha podem possuir um número díspar de nodos vizinhos, o que significa que será possível aplicar de igual forma esta equação em malhas estruturadas e não estruturadas. Para variáveis escalares, como por exemplo a energia cinética turbulenta, a_i , φ_i e b_i são números singulares. Para as equações de conservação, estes elementos representam uma matriz (4x4) ou vetor (4x1), os quais podem ser representadas da forma na forma da equação (2.26).

$$a_i^{nb} = \begin{bmatrix} a_{uu} & a_{uv} & a_{uw} & a_{uu} \\ a_{vu} & a_{vv} & a_{vw} & a_{vp} \\ a_{wu} & a_{wv} & a_{ww} & a_{wp} \\ a_{pu} & a_{pv} & a_{pw} & a_{pp} \end{bmatrix}_i^{nb} \quad \varphi_i^{nb} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \end{Bmatrix}_i^{nb} \quad b_i^{nb} = \begin{Bmatrix} b_u \\ b_v \\ b_w \\ b_p \end{Bmatrix}_i^{nb} \quad (2.26)$$

Para a resolução destas equações, o código usado aplica uma estratégia de conjugação num único sistema de equações para a resolução do campo de velocidades e do campo de pressões, usando um método totalmente implícito para discretização temporal. O sistema linearizado das equações pode ser assim escrito na forma da equação (2.27).

$$[A] \cdot [\varphi] = [b] \quad (2.27)$$

Na equação (2.27) a matriz $[A]$ é a matriz dos coeficientes, $[\varphi]$ é o vetor solução e $[b]$ é o vetor dos termos independentes. O referido método implícito usado na resolução deste sistema de equações inicia-se com uma aproximação para a solução φ^n que de forma iterativa se vai aproximando da solução final através de uma correção φ' para a solução φ^{n+1} . Sob a forma de equação (2.28), isto significa que:

$$\varphi^{n+1} = \varphi^n + \varphi' \quad (2.28)$$

Na equação (2.28), φ' é uma solução da equação (2.29):

$$A \cdot \varphi' = r^n \quad (2.29)$$

Sendo que o resíduo r^n obtido através da equação (2.30):

$$r^n = b - A \cdot \varphi^n \quad (2.30)$$

A resolução sucessiva e iterativa de (2.28) com recurso a (2.26) conduz a uma solução final com uma determinada precisão ou erro, o qual é representado pelo valor final de r^n . No caso do programa *Fluent* para cada variável φ este resíduo r^n é normalizado através da equação 2.29.

$$[\bar{r}_\varphi] = \frac{[r_\varphi]}{a_p \cdot \Delta\varphi} \quad (2.31)$$

Na equação (2.31) temos:

- r_φ que representa a diferença global dos resíduos do volume de controlo;
- a_p , o coeficiente representativo dos coeficientes dos volumes de controlo;
- $\Delta\varphi$ que representa o valor da variação de φ no domínio de cálculo.

A Raiz Média Quadrática ou RMS (Root Mean Square) para cada variável pode ser calculada através da elevação ao quadrado de cada resíduo do respetivo volume de controlo, fazendo de seguida a média destes quadrados e, por fim, retirando a raiz quadrada da referida média. A evolução de RMS quantifica o historial de convergência da solução, sendo este um indicador para a avaliação da convergência do processo numérico. Usualmente, os valores dos resíduos ou RMS podem ser divididos em três intervalos principais:

- $RMS \leq 10^{-4}$ traduz resultados com um nível de convergência suficiente.
- $RMS \leq 10^{-5}$ traduz resultados com um nível de convergência bom.
- $RMS \leq 10^{-6}$ traduz resultados com um nível de convergência muito bom.

Para o presente trabalho foi sempre considerado o critério de convergência para $RMS \leq 10^{-5}$

2.1.3.3. Modelo de turbulência

Um dos métodos mais usados na resolução das equações de Navier-Stokes apontadas anteriormente baseia-se na resolução das equações de transporte de Reynolds e denomina-se média das equações de Navier-Stokes ou RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*). Estas equações são obtidas através da substituição de cada variável dependente da equação (2.11) pela sua média temporal somada com uma quantidade flutuante, tal como se encontra representado na equação (2.32). Após a referida substituição resulta a equação (2.33).

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.32)$$

$$\rho \cdot \bar{u}_j \cdot \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \cdot \bar{g}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left[-p \cdot \delta_{i,j} + \mu \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \cdot \overline{u'_i \cdot u'_j} \right] \quad (2.33)$$

Na equação (2.33) temos:

- \bar{u}_i que representa, em coordenadas cartesianas, a componente da velocidade média na respetiva direção. Se a direção a ser calculada for x então $i = 1$, se direção for y então $i = 2$ e se direção for z então $i = 3$.
- $\delta_{i,j}$ que representa o símbolo de Kronecker. $\delta_{i,j}$ toma o valor de 1 se $i = j$. Caso $i \neq j$, $\delta_{i,j}$ toma o valor de 0.

O primeiro membro da equação (2.33) representa a alteração na média do momentum do elemento de fluido devido à instabilidade nos valores médios do escoamento e a convecção através do escoamento médio. Esta alteração é balanceada no segundo membro, pelas forças de campo médias, o gradiente de pressões, as tensões viscosas e as tensões viscosas aparentes devido às flutuações da velocidade $-\rho \cdot \overline{u'_i \cdot u'_j}$, designadas de tensões de Reynolds.

As tensões de Reynolds, que reúnem as novas incógnitas envolvidas na introdução das componentes flutuantes da velocidade através da equação (2.32), requerem equações adicionais para resolver o problema de fecho das equações RANS. Foi a determinação destas incógnitas que conduziu ao desenvolvimento dos modelos de turbulência.

Os modelos de turbulência disponibilizados pelo programa *Fluent*, designados de modelos de viscosidade turbilhonar, do inglês *eddy-viscosity*, baseiam-se em duas equações de

transporte adicionais que representam as propriedades turbulentas do escoamento. Na maioria destes modelos, uma das variáveis de transporte envolvidas é a energia cinética turbulenta (k) e a segunda variável depende do modelo usado, sendo as mais comuns a taxa de dissipação turbulenta (ε) do modelo $k-\varepsilon$, ou a taxa de dissipação específica (ω) do modelo $k-\omega$. A primeira variável pode ser vista como a que determina a energia presente na turbulência enquanto a segunda pode ser vista como a que determina a sua escala espacial ou temporal.

Durante a elaboração do presente trabalho foi usado o modelo de turbulência $k-\omega$, uma vez que este já havia sido o modelo de turbulência usado em (P. B. Silva, 2023) e devido à maior familiaridade com o mesmo. Assim sendo, encontra-se exposto de seguida um breve resumo das vantagens deste modelo, bem como as equações usadas na resolução numérica do mesmo.

A equação de frequência de turbulência (ω) de larga escala é uma alternativa à equação da dissipação turbulenta (ε). Esta aproximação, usada no modelo $k-\omega$, tem vantagens significativas junto das superfícies, uma vez que prevê de forma mais precisa o comprimento característico dos turbilhões em zonas do escoamento com gradientes de pressão adversa. Isto resulta em melhores resultados na determinação das tensões de corte e das transferências de calor junto às superfícies sólidas. O modelo $k-\omega$ considera as seguintes equações de transporte:

$$\frac{\partial(\rho \cdot k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot \bar{u}_j \cdot k)}{\partial x_j} = P_k - \beta' \cdot \rho \cdot k \cdot \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left(\Gamma_k \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot \bar{u}_j \cdot \omega)}{\partial x_j} = \alpha \cdot \frac{\omega}{k} \cdot P_k - \beta \cdot \rho \cdot \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left(\Gamma_\omega \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \quad (2.35)$$

Nas equações (2.34) e (2.35) temos as incógnitas Γ_k e Γ_ω que representam as simplificações indicadas nas equações (2.36) e (2.37), respetivamente

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (2.36)$$

$$\Gamma_{\omega} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega}} \quad (2.37)$$

A viscosidade turbulenta é calculada combinando k e ω tal como se encontra exposto na equação (2.38).

$$\mu_t = \rho \cdot \frac{k}{\omega} \quad (2.38)$$

Por sua vez, as constantes deste modelo normalmente assumem os seguintes valores:

$$\beta' = 0.09 \quad \alpha = 5/9 \quad \beta = 3/40 \quad \sigma_k = 2.0 \quad \sigma_{\omega} = 2.0$$

2.1.3.4. Tratamento numérico das camadas limite

Camada limite é o termo usado quando nos queremos referir à zona de um escoamento junto a uma superfície sólida. No caso de discretização do domínio do fluido, esta camada situar-se-á nos volumes de controlo imediatamente acima de uma superfície. Numa análise CFD é importante que o cálculo dos perfis de velocidade, pressão e temperatura sejam realizados de uma forma mais precisa nestas zonas. O refinamento da malha nestas zonas irá influenciar a precisão dos resultados do cálculo das tensões de corte nas superfícies bem como o cálculo das trocas de calor entre o corpo e o escoamento. Para modelar o escoamento na imediação das superfícies é por norma usada uma de duas abordagens: o método de função de parede ou o método de baixo número de Reynolds.

No método de função de parede a região da subcamada viscosa é modelada pelas equações empíricas que fornecem condições de fronteira na proximidade das superfícies sólidas para o escoamento médio e para as equações de transporte de turbulência. Estas equações ligam as condições de fronteira na parede com as variáveis dependentes no nodo mais próximo da parede que se presume estar na zona de escoamento turbulento completamente desenvolvido da camada limite.

Por sua vez, o método de baixo número de Reynolds é uma alternativa ao método de função de parede, calculando o escoamento através das equações de transporte numa malha muito refinada junto às superfícies sólidas. Para que isso seja possível, é necessário garantir que os seus nodos se encontram na subcamada viscosa da camada limite. Para tal é necessário que y^+ apresente valores inferiores a 5, tal como se pode observar no gráfico da Figura 2.21.

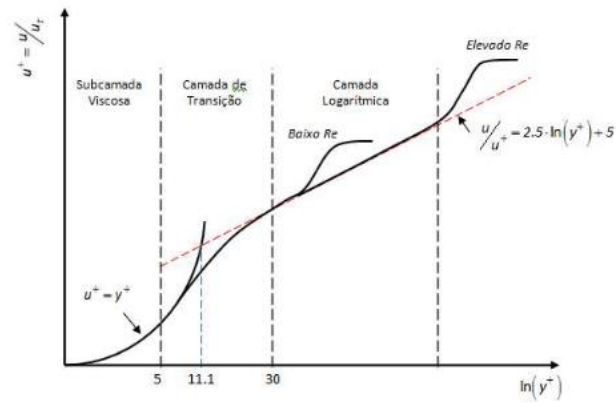


Figura 2.21 – Perfil de velocidades junto a uma superfície sólida, adaptado de (Martinho, 2024)

Tanto o método de função de parede como o método de baixo número de Reynolds possuem vantagens e desvantagens. Para ilustrar as diferenças entre os dois métodos de forma mais simples e clara, as referidas vantagens e desvantagens encontram-se enumeradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens dos métodos de resolução numérica da camada limite

Método	Vantagens	Desvantagens
Função de parede	Menor necessidade computacional – evita a consideração dos efeitos da viscosidade no modelo de turbulência	Resultados dependem da localização do primeiro nodo, que deverá situar-se na subcamada logarítmica
		Omissão da subcamada viscosa da camada limite
		Utilização de equações empíricas para qualquer uso
Baixo número de Reynolds	Resolução das equações de transporte nas subcamadas da camada limite – melhores resultados	Necessidade de maiores recursos computacionais
		Fortes restrições no refinamento da malha junto às paredes. Devem existir nodos na zona de subcamada viscosa limite

Tendo em consideração a informação da Tabela 2.1, bem como o facto de que o programa *Fluent* possui a capacidade de comutar entre o método de função de parede e o método de baixo número de Reynolds em função da resolução da malha de volume na camada limite, foi decidido usar um valor de y^+ inferior a 5. Foi decidido procurar ter valores de y^+ de forma a garantir que estaria a ser usado o método de baixo número de Reynolds para a

resolução numérica dos perfis de velocidade, pressão e temperatura do escoamento na periferia das superfícies sólidas. Uma vez que o método de baixo número de Reynolds tem capacidade de obter resultados melhores resultados para os perfis referidos, optou-se por este método mesmo abdicando de tempos de cálculo mais reduzidos.

2.1.3.5. Modelo de célula MSMD

Um dos maiores desafios encontrados durante a modelação do sistema de gestão térmica desenvolvido no presente trabalho foi a modelação da resposta térmica das células ao longo da sua descarga. Os mecanismos de geração de calor interno nas células podem ser afetados por diversos fatores, como a temperatura externa e a taxa de carga/descarga. Isto significa que a modelação da resposta térmica de uma célula de lítio é um problema de natureza de domínio e física múltiplas. O modelo MSMD (*Multi-Scale Multi-Domain*) permite lidar com domínios com soluções e físicas distintas. O resumo seguinte dos fundamentos relativos ao modelo MSMD e ao submodelo eletroquímico selecionado para o mesmo foi adaptado do manual teórico do programa *Fluent* (Ansys Inc., 2021).

De forma a modelar os perfis térmicos e elétricos o modelo MSMD resolve as equações seguintes ao nível da célula:

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \sigma_+ |\nabla \phi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \phi_-|^2 + \dot{q}_{ECh} + \dot{q}_{short} + \dot{q}_{abuse} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \phi_+) &= -(j_{ECh} + j_{short}) \\ \nabla \cdot (\sigma_- \nabla \phi_-) &= j_{ECh} - j_{short} \end{aligned} \quad (2.40)$$

Nestas equações temos:

- σ_+ e σ_- que representam a condutividade efetiva dos elétrodos positivo e negativo, respetivamente;
- ϕ_+ e ϕ_- que representam os potenciais de campo dos elétrodos positivo e negativo, respetivamente;
- j_{ECh} e \dot{q}_{ECh} que representam a taxa de transferência volumétrica de corrente e o calor gerado devido às reações eletroquímicas, respetivamente;

- j_{short} e \dot{q}_{short} que representam a taxa de transferência volumétrica de corrente e o calor gerado devido a um curto-circuito interno na célula, respetivamente;
- \dot{q}_{abuse} que representa a taxa de calor gerado em condições de *thermal runaway*.

Em condições de funcionamento normal atribui-se o valor zero ao parâmetro \dot{q}_{abuse} . Por sua vez, os parâmetros j_{short} e \dot{q}_{short} também serão assumidos como zero caso não exista um curto-circuito interno. Os parâmetros j_{ECh} e \dot{q}_{ECh} são calculados a partir do submodelo eletroquímico.

O modelo MSMD possui três submodelos eletroquímicos: o modelo NTGK, o modelo ECM e o modelo Newman P2D. O modelo MSMD permite ainda que o utilizador configure o seu modelo eletroquímico recorrendo a funções definidas pelo mesmo. No modelo numérico desenvolvido para o presente trabalho foi aplicado o submodelo NTGK, tal como já havia sido realizado em (P. B. Silva, 2023).

O modelo NTGK é um modelo eletroquímico semi-empírico simples, o qual relaciona a taxa de transferência volumétrica de corrente com o potencial de campo recorrendo à equação (2.41).

$$j_{ECh} = \frac{Q_{nominal}}{Q_{ref} Vol} Y [U - V] \quad (2.41)$$

onde:

- Vol que representa o volume da zona ativa de uma única célula;
- V que representa a tensão da célula, a qual é obtida diretamente a partir do método de rede de circuito ou é calculado a partir de $\varphi_+ - \varphi_-$, valores obtidos a partir do método de solução do modelo MSMD;
- $Q_{nominal}$ que representa a capacidade total da célula em Amperes·hora;
- Q_{ref} que representa a capacidade da célula que foi usada na montagem de recolha de dados experimentais que foram usados para calcular os parâmetros U e Y .

Por sua vez, U e Y são parâmetros que variam em função da profundidade de descarga (DOD). Essa relação pode ser estabelecida recorrendo a tabelas ou recorrendo às equações (2.42) e (2.43).

$$U = \left(\sum_{n=0}^5 a_n (DOD)^n \right) - C_2 (T - T_{ref}) \quad (2.42)$$

$$Y = \left(\sum_{n=0}^5 b_n (DOD)^n \right) \exp \left[-C_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (2.43)$$

Nas equações (2.42) e (2.43), C_1 e C_2 são constantes específicas ao submodelo NTGK. Por outro lado, também é possível usar este submodelo sem determinar U e Y antecipadamente. A relação entre corrente e tensão podem ser armazenadas no sistema e os referidos parâmetros calculados em tempo real durante o cálculo do restante modelo a partir da leitura dos dados armazenados no sistema em tempo real.

Tal como já havia sido referido e apontado nas equações (2.42) e (2.43), os parâmetros U e Y são obtidos a partir do valor de profundidade de descarga (DOD). O submodelo NTGK recorre à equação (2.44) de forma a determinar o valor atual de profundidade de descarga.

$$DOD = \frac{Vol}{3600 Q_{nominal}} \int_0^t j dt \quad (2.44)$$

onde:

- Vol que representa o volume da zona ativa de uma única célula;
- $Q_{nominal}$ que representa a capacidade total da célula em Amperes·hora.

Por fim, o submodelo NTGK calcula a taxa de geração de calor a partir das reações eletroquímicas recorrendo à equação (2.45).

$$\dot{q}_{Ech} = j_{Ech} \left[U - V - T \frac{\partial U}{\partial T} \right] \quad (2.45)$$

2.1.3.6. Critérios de seriação de malha

Tanto na fase de estudo de dependência de malha como na fase de construção do modelo CFD final, é importante ter em conta a qualidade da malha gerada. A qualidade de malha é

um dos fatores que apresenta maior influência na qualidade dos resultados obtidos a partir do cálculo numérico. O programa de cálculo numérico usado no presente trabalho (*Fluent*) representa a qualidade de malha através de dois valores principais: *average skewness* e *orthogonal quality*. A gama de valores, bem como o seu grau de aceitabilidade encontram-se representados na Figura 2.22.



Skewness – espectro de métricas de mesh					
					
Excelente	Muito bom	Bom	Aceitável	Mau	Inaceitável
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00
Orthogonal quality – espectro de métricas de mesh					
					
Inaceitável	Mau	Aceitável	Bom	Muito bom	Excelente
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Figura 2.22 – Critérios de seriação de malhas, adaptado de (Ansys Inc., 2015)

Average skewness tem como objetivo representar o quão próximo do elemento ideal estão os ângulos internos dos elementos de malha de superfície ou quão próximo do tamanho ideal estão os elementos de malha de volume. Para este indicador procuram-se obter valores próximos de 0, os quais representam que, em média, os elementos de malha de superfície/volume estão muito próximos dos seus análogos ideais.

Orthogonal quality procura representar o quão equidistantes do centroide estão as arestas do elemento de malha de superfície. Para o elemento de malha de volume este valor procura quantificar quão equidistantes do centroide do elemento de volume estão cada uma das suas faces. Para este valor procura-se obter valores próximos de 1.

Para todas as malhas geradas ao longo do desenvolvimento do presente trabalho procurou-se gerar malhas que apresentassem valores de *average skewness* inferiores a 0,5 e valores de *orthogonal quality* superiores a 0,4.

2.1.3.7. Metodologia para a elaboração de um modelo CFD

O desenvolvimento de um estudo através de um código numérico de CFD deve envolver um conjunto de procedimentos, com passos que devem ser cumpridos para que se obtenham

resultados o mais próximo da realidade possível. O processo de desenvolvimento de um modelo CFD pode ser dividido em duas fases: a primeira fase onde são determinadas as condições físicas/de modelação do problema, e a segunda fase, onde é elaborado o modelo propriamente dito.

A fase de determinação das condições do problema deve ser sempre realizada em primeiro lugar. As características do problema devem ser determinadas no início da análise do mesmo, incluindo aspetos como caudal e temperatura de entrada do fluido, regime de análise do problema (transiente ou permanente), volume de controlo e relação tempo de cálculo/grau de precisão de resultados.

A segunda fase, ou fase de elaboração do modelo CFD, envolve a realização de vários passos de forma a ser possível obter resultados coerentes que possam ser avaliados e comparados com ensaios experimentais de validação de modelo. Esta fase pode ser dividida nos seguintes passos:

- **1º passo:** Elaboração do modelo geométrico CAD do problema em estudo. Este modelo pode conter apenas o volume de fluido ou pode conter outros sólidos relevantes ao problema em análise (e.g. células eletroquímicas no presente contexto).
- **2º passo:** Elaboração de malha de volumes de controlo inicial. Este passo deve consistir na elaboração da primeira malha, a partir da qual se realizarão os primeiros cálculos CFD que estarão na base ao estudo de dependência de malha e estudo do valor de y^+ (Camada Limite). Todos os processos de geração de malha ao longo da elaboração do modelo CFD devem procurar manter valores de qualidade de malha de superfície e malha de volume dentro de valores aceitáveis, tal como indicado na subsecção 2.1.3.6.
- **3º passo:** Estudo/refinação do valor de y^+ . Este passo deverá consistir num processo iterativo, onde o valor de altura da primeira camada na camada limite do escoamento é ajustado. O objetivo principal deverá ser sempre encontrar um valor de altura para a primeira camada que resulte num valor de y^+ inferior a 5, preferencialmente da ordem de 1 (dependendo do modelo de turbulência) tal como já havia sido referido na subsecção 2.1.3.4.
- **4º passo:** Estudo de dependência de malha. Neste passo o objetivo principal deverá ser variar os valores de tamanho de elemento de malha de superfície e malha de volume, de forma a gerar malhas com um número de elementos que aumentem na

ordem de 1,5 vezes de entre cada iteração. As malhas resultantes deverão ser analisadas nas piores condições para o caso em estudo (e.g. caudal de escoamento máximo) e deverá ser recolhido o valor de uma variável suscetível a variações no seu valor dependendo do grau de refinamento da malha (e.g. força exercida sobre uma superfície). A malha a selecionar para a elaboração do modelo final deverá ser aquela em que o erro associado à diferença entre a malha atual e anterior não apresentar variações significativas, ou seja, preferencialmente inferior a cerca de 2% pela segunda iteração consecutiva.

- **5º passo:** Elaboração do caso CFD. Neste passo são simuladas todas as condições no modelo CFD que se procuram avaliar de acordo com as condições do problema estabelecidas na primeira fase de elaboração do estudo. Para o caso de estudo do presente trabalho isto significou configurar aspetos como diferentes condições de fronteira e o modelo MSMD.
- **6º passo:** Recolha de resultados. O último passo no processo consiste na recolha de dados, quer seja para comparação com dados anteriores (e.g. durante o processo de refinamento do valor de y^+ ou estudo de dependência de malha), quer seja para efeitos de registo e comparação com resultados de uma montagem experimental. No contexto do presente trabalho, apenas foram considerados dados válidos os dados recolhidos de cálculos numéricos onde todos os resíduos apresentaram valores inferiores a 10^{-5} .

2.2. Estado da arte

A presente secção tem como principal objetivo apresentar resumos da pesquisa bibliográfica que foi realizada no âmbito do presente trabalho, nomeadamente considerando as implementações mais recentes de sistemas de gestão térmica de células de lítio na indústria automóvel.

Zhang et al. (Zhang et al., 2022) apresentam uma revisão atual do estado da arte no campo da gestão térmica de células de lítio. Neste artigo são apontadas três principais abordagens: arrefecimento recorrendo ao fluxo de ar, arrefecimento recorrendo ao fluxo de fluido refrigerante e arrefecimento recorrendo a materiais de estado fluido ou PCM. Tal como já havia sido referido em 2.1.1.4, os sistemas que recorrem a PCM ainda necessitam de desenvolvimento para viabilizar a sua aplicação em acumuladores de energia de veículos

elétricos e híbridos, pelo que não foi encontrado nenhum caso de aplicação desta tecnologia em casos da indústria automóvel. Como tal, as subsecções 2.2.1 e 2.2.2 focaram-se na exposição e análise de sistemas de gestão térmica com recurso ao fluxo de ar e sistemas de gestão térmica com recurso a fluido, respetivamente.

2.2.1. Sistemas de gestão térmica com recurso a ar

Tal como referido na subsecção 2.1.1.4, os sistemas de gestão térmica com recurso a ar são os mais observados em veículos elétricos/híbridos citadinos, tal como o Toyota Prius ou Honda Insight (CFD Flow Engineering, 2023). É sobre a solução de sistema de gestão térmica com recurso a ar, desenvolvida pelo construtor Toyota (Figura 2.23), que irá ser realizada a análise de estado da arte da presente secção. Este sistema foi selecionado visto ser um exemplo típico e simples de um sistema de gestão térmica de células recorrendo ao fluxo de ar.

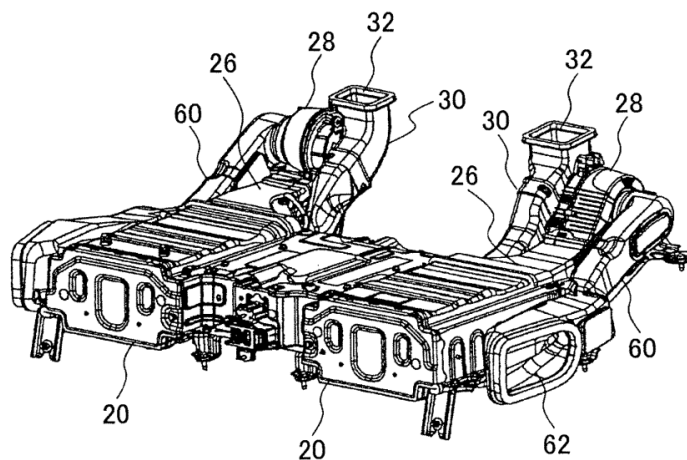


Figura 2.23 – Esquemático sistema gestão térmica de células recorrendo ao fluxo de ar, adaptado de (Tsuchiya et al., 2014)

A solução apresentada na Figura 2.23 e detalhada na Figura 2.24 é muito comum em veículos da gama dos veículos citadinos, visto ser um sistema de baixa complexidade, baixo número de componentes e, por conseguinte, baixo custo. Estes fatores são os grandes contribuidores para a adoção deste tipo de sistemas de gestão térmica de células nesta gama de veículos, onde o custo é um dos fatores de maior relevância.

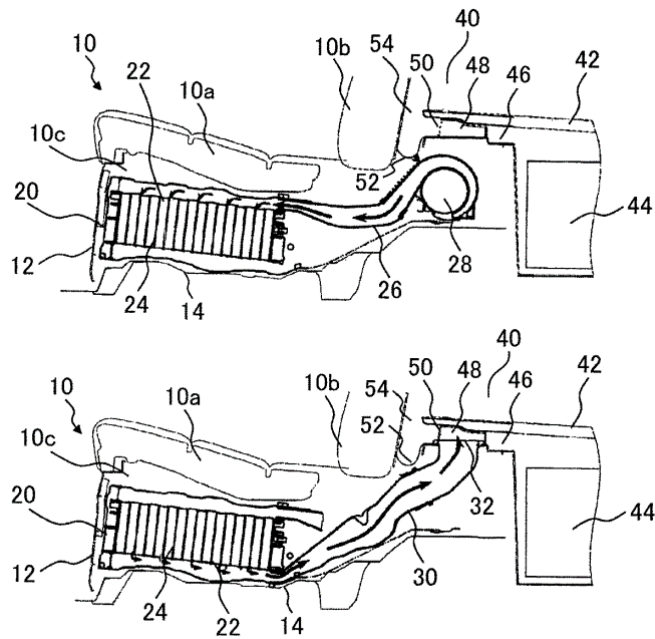


Figura 2.24 – Vista em corte do sistema de sistema de refrigeração recorrendo ao fluxo de ar, adaptado de (Tsuchiya et al., 2014)

Nas vistas em corte da Figura 2.24 é possível observar o trajeto do ar bem como a forma como este é obtido e de seguida enviado para o interior do bloco de células (20 da Figura 2.24). No sistema patenteado pelo construtor Toyota existe a aplicação de um ventilador (28 da Figura 2.24), o qual obtém ar da cabine do veículo através das entradas 62 da Figura 2.23. O ar é de seguida direcionado para o topo do interior do bloco de células através da conduta 26 da Figura 2.24, onde atinge numa fase inicial o topo das células, percorrendo o seu comprimento até atingir o fundo do bloco de células. Neste sistema, a saída de ar é feita pela conduta 30 da Figura 2.24 até à porta de escape 32 da Figura 2.23, a qual liberta o ar que já atravessou o bloco de células para a zona do compartimento de bagagem.

2.2.2. Sistemas de gestão térmica com recurso a líquidos

Tal como havia sido referido na subsecção 2.1.1.4, os sistemas de gestão térmica de células que recorrem a um líquido podem ser classificados em dois grupos: sistemas de gestão térmica com líquido em contacto indireto ou sistemas de gestão térmica de imersão líquida.

Os sistemas de gestão térmica com fluido em contacto indireto são aplicados num grande número de acumuladores de energia de veículos elétrico/híbridos comercializados atualmente. Nesta subsecção são analisados dois sistemas distintos de refrigeração indireta

a fluido: o primeiro baseado em placas de refrigeração, do inglês *cooling plates*, aplicado no modelo Air do construtor Lucid e um segundo baseado em tubos de refrigeração, do inglês *cooling pipes*, desenvolvido pelo construtor Tesla e aplicado em vários dos seus veículos.

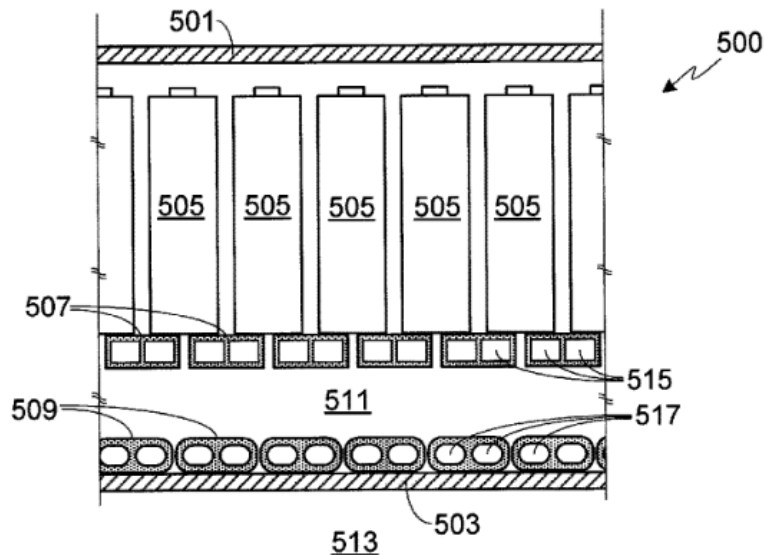


Figura 2.25 – Vista em corte do sistema de gestão térmica com fluido em contacto indireto aplicado no Lucid Air, adaptado de (Rawlinson, 2014)

O sistema de gestão térmica representado na Figura 2.25, desenvolvido por (Rawlinson, 2014), baseia-se na aplicação de placas de refrigeração sobre as células. Neste esquemático é possível observar que as passagens do fluido atravessam uma placa aplicada sobre os polos negativos das células. Esta placa de refrigeração contém não só os canais de refrigerante termicamente acoplados às células (507 da Figura 2.25) como ainda contém uma camada de isolamento térmico (511 da Figura 2.25) e canais de refrigeração termicamente acoplados à parede exterior do *pack* de células (517 da Figura 2.25). Segundo a patente, este empilhamento de camadas serve para que seja possível obter um maior controlo sobre as trocas de calor entre as células e o circuito de gestão térmica, de forma que o efeito da temperatura ambiente seja o mais reduzido possível nas referidas trocas de calor. No modelo Air da construtora Lucid, as placas encontram-se aplicadas da mesma forma no bloco de baterias (Figura 2.26).



Figura 2.26 – Vista isométrica do sistema de refrigeração a fluido indireto de células, adaptado de (Lucid Motors, 2022)

É ainda possível observar na Figura 2.26 que, desde o patenteamento inicial do sistema por (Rawlinson, 2014), a placa de refrigeração sofreu várias melhorias. Em (Lucid Motors, 2022), Rawlinson indica que o fluxo do fluido é agora realizado em “U”, facto que é confirmado pela presença da entrada e saída do fluido na mesma extremidade da placa. Para além disso em (Lucid Motors, 2022) é ainda indicado que as indentações observadas na Figura 2.26 servem um duplo propósito. Não só têm como função manter as duas chapas de alumínio estampado unidas mesmo sob a pressão da mistura água/glicol, como também servem como geradores de turbulência no escoamento do fluido. Esta turbulência irá energizar o escoamento nas imediações das superfícies interiores da placa, o que irá aumentar a taxa de transferência de calor.

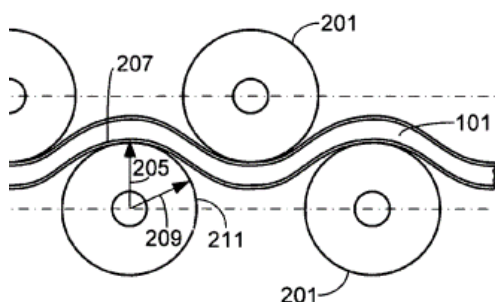


Figura 2.27 – Esquerda: Detalhe dos canais de fluido (Hermann, 2012); Direita: Vista de topo dos canais de fluido (Bhowmick, 2021)

Na Figura 2.27 encontram-se representados os tubos de passagem do fluido de refrigeração, incluídos no sistema de gestão térmica patenteado pelo construtor Tesla. O sistema de gestão térmica com fluido em contacto indireto registado na patente (Pires et al., 2020) foi

construído sobre as estruturas patenteadas previamente pelo construtor em (Hermann, 2012). Em (Hermann, 2012) foi proposta uma primeira versão dos tubos onde a direção do fluxo de fluido seria alternado entre tubos adjacentes de forma a obter maior homogeneidade de temperaturas no interior do bloco. Isto era conseguido tendo apenas uma entrada e saída de fluido, tal como se pode observar na Figura 2.27 à direita.



Figura 2.28 – Vista de detalhe dos pontos de entrada e saída de fluido, adaptado de (Battery Design, 2022)

Desde a submissão da patente, as estruturas propostas em (Hermann, 2012) foram reestruturadas, de forma a possibilitar fluxos de fluido individuais. É possível observar este desenvolvimento no bloco de células aplicado a um veículo moderno Tesla (Figura 2.28). Na Figura 2.28 é possível observar que existem entradas e saídas de fluido individuais a cada tubo, ao contrário do que se observa na Figura 2.27 à direita. Isto confirma o conceito exposto na patente (Pires et al., 2020), onde se encontra indicado que os tubos poderão possuir canais interiores, os quais resultam num escoamento do fluido de refrigeração em “U”. Adicionalmente foi ainda introduzido um maior número de tubos o que, em conjugação com a reestruturação dos mesmos, foram introduzidos com o intuito de aumentar a homogeneidade de temperaturas no interior do bloco.

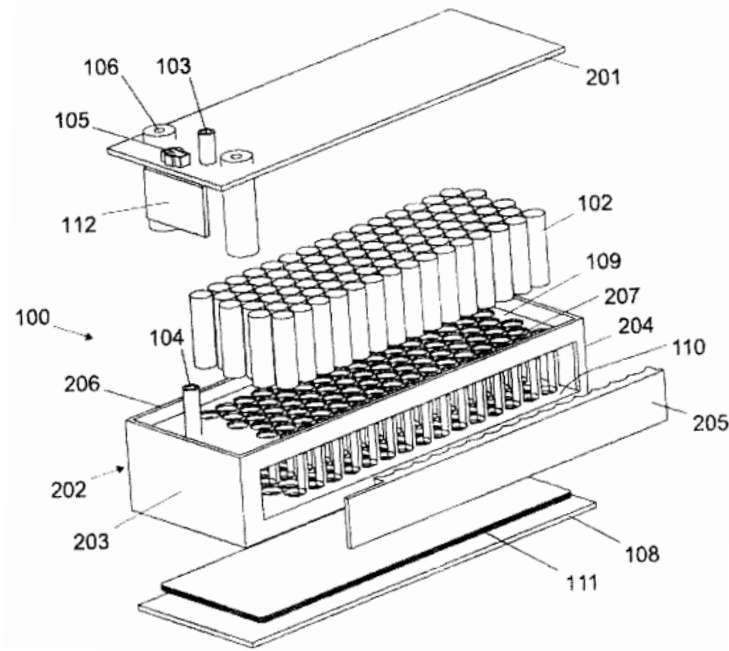


Figura 2.29 – Vista explodida do bloco de células e sistema de gestão térmica de imersão líquida, adaptado de (Totman et al., 2021)

Por fim, ainda dentro do grupo dos sistemas de gestão térmica de células com recurso a fluido, temos o subgrupo dos sistemas de gestão térmica de imersão líquida. Um excelente exemplo do estado da arte neste subgrupo é o bloco de células desenvolvido pelo braço de engenharia do construtor Rimac (Figura 2.29) para o modelo Regera, do construtor Koenigsegg. O Regera é um veículo superdesportivo híbrido e, como tal, necessita de ter um desempenho muito superior aos modelos de veículo já abordados em 2.2.1. Isto significa que irão ser solicitadas correntes elétricas muito superiores às observadas nos outros modelos de veículo já discutidos, o que irá gerar uma maior quantidade de calor. Para além disso, num veículo do patamar do Regera é esperado que seja possível extrair o máximo desempenho do veículo em qualquer momento. Assim sendo, a solução proposta em (Totman et al., 2021) consiste numa solução com base na imersão completa das células em fluido dielétrico refrigerante (Figura 2.30).

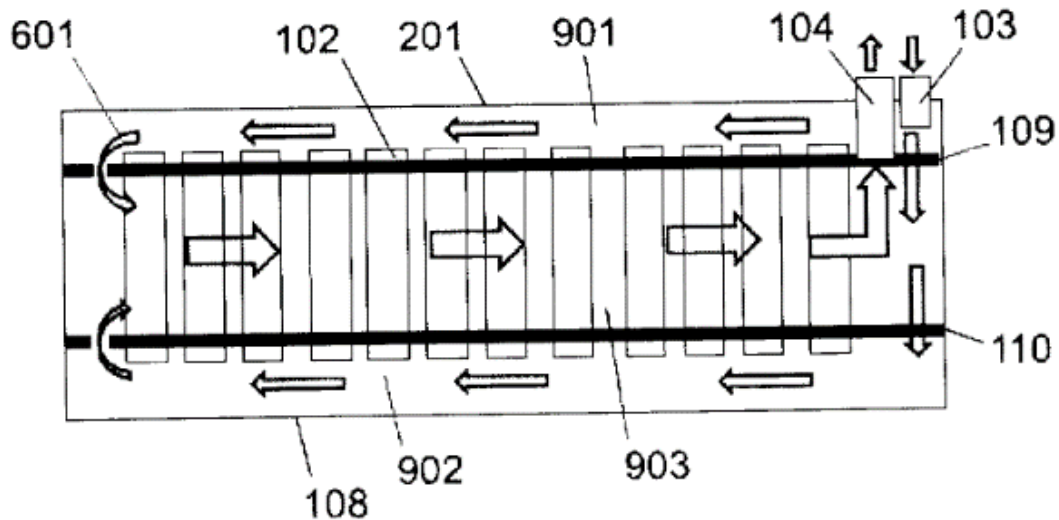


Figura 2.30 – Vista em corte do bloco de células e sistema de gestão térmica de imersão líquida, adaptado de (Totman et al., 2021)

Na Figura 2.30 é possível observar que as células presentes no módulo se encontram completamente submersas. Neste módulo, a entrada e saída de fluido dielétrico ocorrem em pontos paralelos (103 e 104 da Figura 2.30, respetivamente). A entrada de fluido (103) permite o escoamento de fluido no canal superior (901) e inferior (902), sendo o mesmo direcionado até ao ponto onde este realiza a inversão da direção do escoamento (601) e entra no canal central do bloco de células (903). Até este ponto (601) o fluido apenas esteve em contacto com os polos das células. Será expectável que a partir de 601 será realizado a maior quota da transferência de calor global deste sistema, uma vez que será neste canal central (903) que o fluido estará em contacto com a maior área de células. A geometria interna do bloco direciona, na zona final do canal central (903), o escoamento de fluido para a saída do bloco, para que este seja depois guiado para os permutadores de calor do veículo, onde será expulso o calor removido das células. De realçar que a patente indica que esta configuração é apenas uma das possíveis, sendo que aspetos como a posição da entrada (103) e saída (104) do fluido podem ser realizadas noutros pontos do bloco de células.

3. Caso de referência – caracterização térmica de uma única célula

Para que fosse possível realizar o desenvolvimento e análise do invólucro de células desenvolvido no presente trabalho, foi necessário caracterizar e conhecer a resposta térmica das células Molicel P42a. Este tipo de células já havia sido selecionado pela empresa parceira para aplicação nos seus acumuladores de energia. Por sua vez, a resposta térmica deste tipo de células já havia sido caracterizada em (P. B. Silva, 2023).

Durante a elaboração do seu trabalho, Silva procurou caracterizar a resposta térmica de uma única célula em condições de convecção natural com ar e convecção forçada em meio líquido, com contacto direto entre a célula e o fluido.

A empresa parceira também já havia definido que a solução do sistema de gestão térmica das células passaria pela refrigeração por imersão recorrendo ao fluido dielétrico MIVOLT DF7. Esta decisão foi tomada tendo em consideração os prós e contras de cada solução de gestão térmica, os quais foram apontados na subsecção 2.1.1.4.

Assim sendo, a etapa seguinte do presente trabalho passou por replicar o modelo de convecção forçada em meio líquido desenvolvido em (P. B. Silva, 2023), o qual será mencionado doravante como caso de referência. A replicação do caso de referência teve como objetivo confirmar a configuração mais adequada do modelo de célula MSMD através da comparação de resultados obtidos com os valores obtidos em (P. B. Silva, 2023).

O desenvolvimento do caso de referência seguiu a metodologia apontada em 2.1.3.7. A presente secção está dividida em duas subsecções: a subsecção 3.1, a qual abordou as condições do caso de estudo, e a subsecção 3.2, que abordou os métodos numéricos usados no modelo CFD desenvolvido para o caso de referência bem como a análise de resultados obtidos do caso de referência.

3.1. Condições de fronteira

De acordo com a metodologia apontada em 2.1.3.7, o primeiro passo na elaboração de um modelo CFD consiste na definição física do problema, incluído as respetivas condições de

fronteira. Para o estudo do caso de referência procurou-se replicar as condições do problema usadas em (P. B. Silva, 2023) e apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Condições do caso de referência

Fluido de refrigeração	MIVOLT DF7
Velocidade de entrada do fluido	1 m/s
Temperatura de entrada do fluido	25 °C
C-Rate da montagem de células	4C (4.2 A)

3.2. Métodos numéricos

No seu trabalho, Silva (P. B. Silva, 2023) caracterizou a resposta térmica da célula em convecção forçada em meio líquido recorrendo à montagem da Figura 3.1. Foi sobre a geometria da referida montagem que os modelos numéricos da resposta térmica da célula foram desenvolvidos em (P. B. Silva, 2023) e, como tal, foi também sobre esta geometria que incidiu o estudo do caso de referência do presente trabalho.

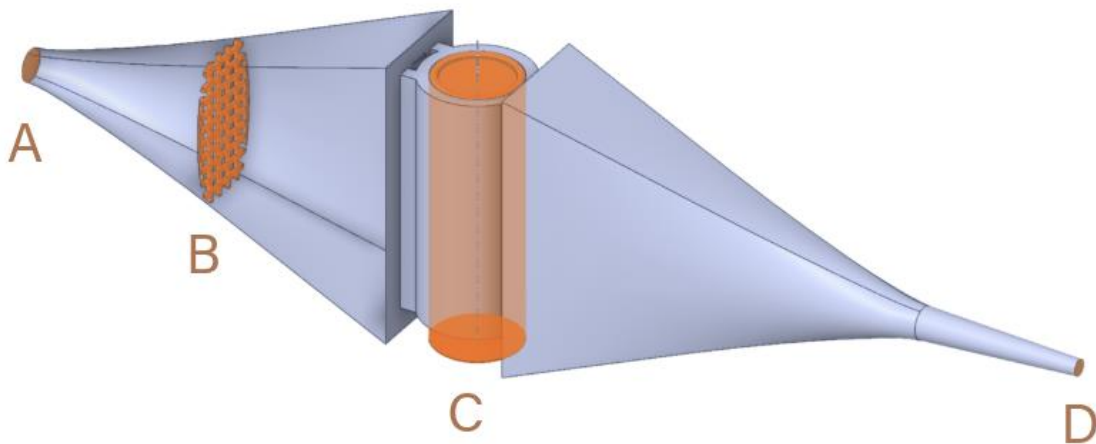


Figura 3.1 – Geometria do volume de controlo do caso de referência, adaptado de (P. B. Silva, 2023)

De acordo Silva (P. B. Silva, 2023), o modelo CFD elaborado teve como base o volume apresentado na Figura 3.1. Este volume pode ser dividido em três zonas: a entrada (A da Figura 3.1), a zona de contacto com a célula (C da Figura 3.1) e a saída (D da Figura 3.1). A entrada contém o volume de entrada do fluido, o qual se expande até se atingir a zona da célula. A entrada contém ainda um difusor (B da Figura 3.1), o qual tem como função homogeneizar o escoamento do fluido antes deste atingir a célula. A zona da célula possui

uma geometria que replica as passagens do fluido do invólucro desenvolvido pela empresa parceira até à data da elaboração de (P. B. Silva, 2023). A análise do caso de referência foi dividida em duas partes: o estudo de dependência de malha e a elaboração do modelo CFD de estudo e validação do caso de referência.

3.2.1. Estudo de dependência de malha no caso de referência

No presente trabalho, na fase de estudo de dependência de malha para o caso de referência, o modelo CFD foi configurado segundo as características da Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Configuração da simulação numérica para estudo de dependência de malha no volume de fluido dielétrico

Geral		
Regime temporal	Permanente	
Modelos		
Modelos ativos	Turbulência (SST)	
Materiais		
Material do fluido	Densidade	916 kg/m ³
	Viscosidade	0,015 kg/m·s
Condições de fronteira		
Entrada	Velocidade do fluido	1 m/s
Saída	Pressão	0 Pa
Paredes do invólucro	Condições térmicas	Adiabáticas
	Sem escorregamento	

Em comparação com o modelo CFD final do caso de referência, no presente trabalho o modelo do estudo de dependência de malha apresentou menor complexidade, não tendo sido implementadas características como regime transiente e o modelo da célula eletroquímica, de forma a reduzir o tempo necessário para a realização do processo de estudo de dependência de malha. Durante a fase de estudo de dependência de malha procurou-se usar malhas que cumprissem os critérios de seriação expostos em 2.1.3.6.

Os dados recolhidos durante o processo de estudo de dependência de malha consistiram nos valores de qualidade malha *average skewness* e *orthogonal quality*, o valor de y^+ bem como um valor de uma gradeza variável com a precisão do cálculo numérico do fluxo de fluido. Para esta fase foi selecionado avaliar o valor da velocidade do fluido em quatro pontos

distintos. Estes pontos encontram-se distribuídos ao longo de uma linha imaginária que atravessa o centro geométrico do volume em análise, tal como se encontra representado na Figura 3.2.

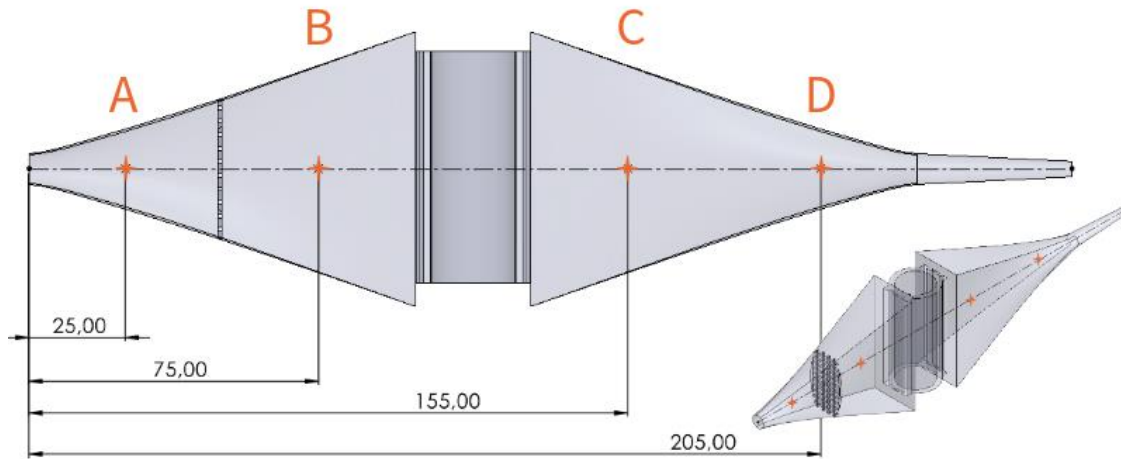


Figura 3.2 – Pontos de medição de velocidade do escoamento para o estudo de dependência de malha

Os resultados do estudo de dependência de malha foram obtidos seguindo os passos referentes à etapa do estudo de dependência de malha apontados na metodologia exposta em 2.1.3.7. Os resultados deste estudo apresentam-se no gráfico na Figura 3.3.

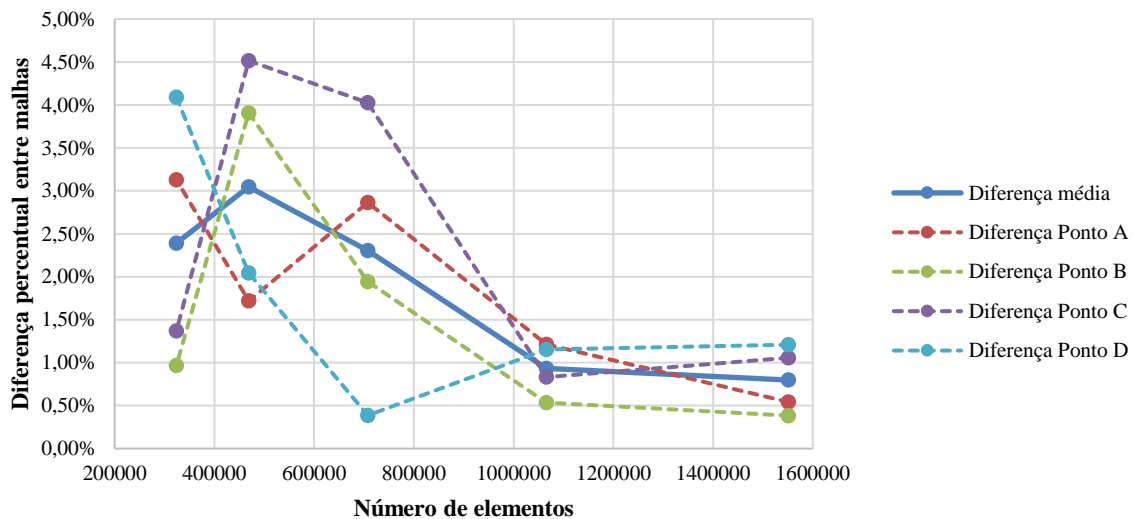


Figura 3.3 – Resultados do estudo de dependência de malha para o caso de referência

Tendo em consideração os resultados anteriormente expostos, a malha com 1,15 milhões de elementos foi a malha seleccionada, e, por conseguinte, usada para obter os resultados

expostos na subseção seguinte, visto que esta apresentou uma diferença inferior a 2% no valor de velocidade nos pontos avaliados pela segunda iteração consecutiva.

3.2.2. Estudo CFD do caso de referência

Após ter sido concluído o processo de estudo de dependência de malha, o próximo passo do processo passou pela elaboração do estudo CFD contendo todas as características necessárias à modelação numérica do cenário em análise no caso de referência.

O modelo do caso de referência usado no presente trabalho foi elaborado com o objetivo de validar os resultados numéricos, realizando uma comparação entre estes e os resultados homólogos obtidos por Silva (P. B. Silva, 2023). Assim sendo, foi necessário incluir o corpo da célula e configurar o modelo usado para simular o comportamento das células de íons de lítio - MSMD. As configurações do modelo CFD final para o caso de referência são resumidas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Configuração da simulação numérica do modelo final do caso de referência

Geral		
Regime temporal	Transiente	
Modelos		
Modelos ativos	Energia, Turbulência ($k-\omega$) e Baterias	
Método de cálculo modelo de baterias	MSMD	
Modelo eletroquímico	NTGK	
Fontes de calor	Efeito de Joule nas zonas ativas e passivas e reações químicas	
Capacidade nominal da célula	4,2 Ah	
<i>C-Rate</i>	4C	
Tensão de corte inferior	3,1 V	
Tensão de corte superior	4,2 V	
Materiais		
Material do fluido	Densidade	916 kg/m ³
	Calor específico	1906 J/kg·K
	Condutividade térmica	0,129 W/m·K
	Viscosidade	0,015 kg/m·s
Material da zona ativa	Densidade	2092 kg/m ³
	Calor específico	678 J/kg·K

	Condutividade térmica	18,2 W/m·K
	Condutividade elétrica	UDS 0 = 1.19e+06
		UDS 1 = 9.83e+05
Material das zonas passivas (polos das células)	Densidade	8978 kg/m ³
	Calor específico	381 J/kg·K
	Condutividade térmica	387,6 W/m·K
	Condutividade elétrica	1e+07 S/m
Condições de fronteira		
Entrada	Velocidade do fluido	1 m/s
	Temperatura	25 °C
Saída	Pressão	0 Pa
Paredes externas expostas ao ambiente	Condições térmicas	Adiabáticas
	Sem escorregamento	

De forma a validar a correta configuração do modelo CFD para o caso de referência, foram registados os valores de temperatura de célula ao longo de todo o regime transiente analisado no modelo CFD e desenvolvido para o caso de referência. O gráfico da Figura 3.4 contém a diferença entre os valores de temperatura obtidos no modelo desenvolvido em (P. B. Silva, 2023) e os valores de temperatura obtidos no modelo do caso de referência do presente trabalho.

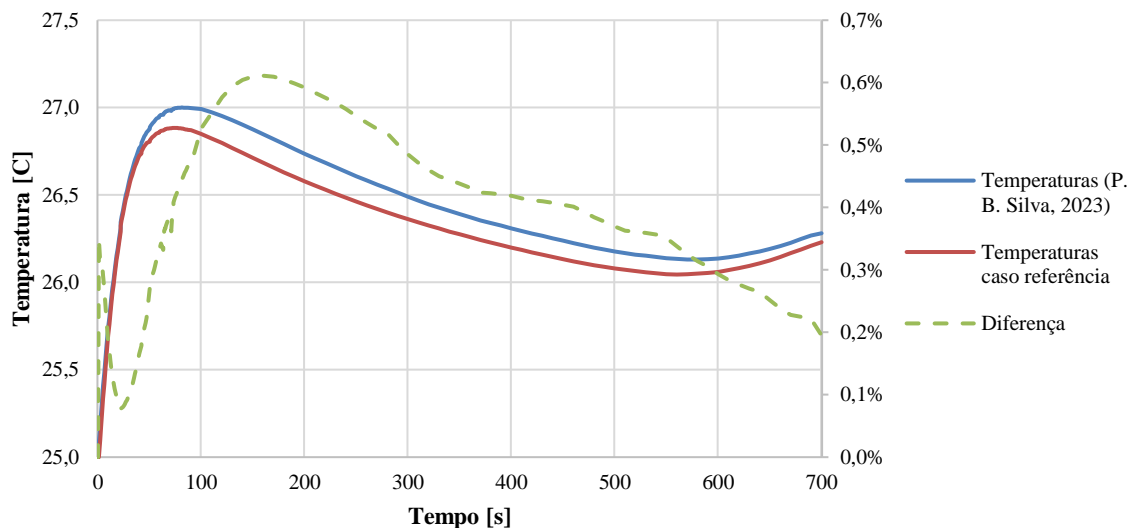


Figura 3.4 – Comparação entre os resultados obtidos em (P. B. Silva, 2023) e o caso de referência

Como se pode observar pelos resultados da Figura 3.4, o modelo de célula implementado no modelo CFD desenvolvido para o caso de referência do presente trabalho foi em tudo

análogo ao desenvolvido por Silva (P. B. Silva, 2023), visto apresentar diferenças nos valores de temperaturas que podem ser atribuídos a diferenças nos parâmetros de geração de malha.

Ainda, a diferença entre os resultados de temperatura na célula obtidos a partir do modelo CFD e montagem experimental em (P. B. Silva, 2023) foram conhecidos durante o desenvolvimento do presente trabalho. Não obstante as diferenças entre estes resultados e os homólogos experimentais, dado que o objetivo do presente trabalho era o desenvolvimento do invólucro propriamente dito, foi usado o modelo de célula desenvolvido por Silva (P. B. Silva, 2023) para o modelo CFD final do presente trabalho.

4. Caso de estudo – arrefecimento de bloco de células de lítio

O processo de elaboração e avaliação do caso de referência permitiu validar a configuração do modelo de célula desenvolvido por Silva (P. B. Silva, 2023). Nesta sequência, a etapa seguinte do presente trabalho passou pela elaboração do caso de estudo, a qual envolveu o cálculo numérico da montagem de células a avaliar, bem como a construção da montagem experimental de validação do referido cálculo numérico.

O presente capítulo contém o processo de elaboração do modelo CFD do caso de estudo, bem como o desenvolvimento da montagem experimental de validação. Assim sendo o presente capítulo encontra-se dividido em cinco subsecções sendo que:

- Na subsecção 4.1 é abordado o processo de determinação das condições do caso de estudo.
- Na subsecção 4.2 é apresentado o processo de construção do invólucro desenvolvido, o qual foi condicionado pelas condições estabelecidas em 4.1.
- Na subsecção 4.3 encontra-se exposto o processo de construção do modelo CFD final do caso de estudo.
- Na subsecção 4.4 é descrito o desenvolvimento do circuito eletrónico de aquisição de dados construído para os ensaios experimentais.
- Na subsecção 4.5 são apresentadas as características da montagem experimental, incluindo características físicas da montagem, características dos equipamentos usados e metodologia de execução do ensaio experimental.

4.1. Características do caso de estudo

De acordo com a metodologia exposta em 2.1.3.7, inicialmente foi necessário determinar as condições do problema a analisar. No caso do sistema de gestão térmica desenvolvido, isto significou determinar os fatores indicados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Condições do caso de estudo

Fluido de refrigeração dielétrico	MIVOLT DF7
Caudal do fluido de refrigeração	0,0266 kg/s (1,74 l/min)
Temperatura de entrada do fluido	25 °C
Temperatura no exterior do invólucro	25 °C
C-Rate da montagem de células	4C (67.2 A)

O fluido de refrigeração - MIVOLT DF7 - foi o selecionado pela empresa parceira por ser um fluido desenvolvido com o propósito explícito de ser aplicado na refrigeração de blocos de células eletroquímicas. Este fluido apresenta características como baixa expansão térmica e baixa condutividade elétrica, características ideais para a aplicação num sistema de gestão térmica de células de lítio.

O valor de caudal do fluido foi determinado pelo caudal que a bomba selecionada para o sistema final de gestão térmica tem capacidade de fornecer. A empresa selecionou a bomba Pierburg CWA-150, cuja curva característica se encontra representada na Figura 4.1.

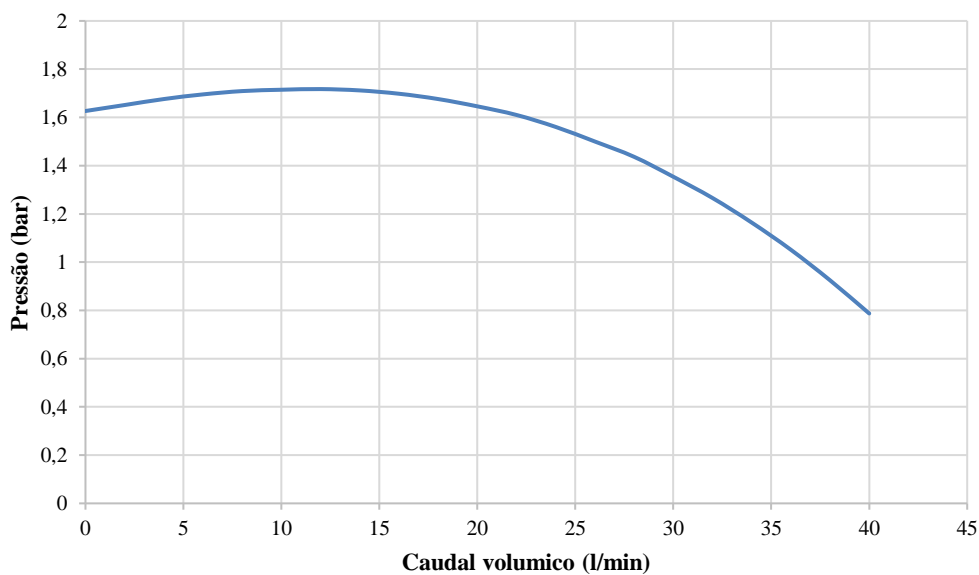


Figura 4.1 – Gráfico caudal volumétrico vs pressão gerada da bomba Pierburg CWA-150, adaptado de (Tecomotive, 2024)

Nesta fase foi decidido usar para caudal de entrada no modelo CFD o valor de caudal volumétrico no ponto em que a bomba CWA-150 consegue disponibilizar o maior valor de caudal – 40 l/min a 0,8 bar. Existiram ainda dois aspetos que influenciaram o valor final de

caudal de fluido: a razão pela qual o invólucro desenvolvido foi reduzido em relação ao original, a qual será exposta com maior detalhe na subsecção 4.2, e a configuração da montagem do sistema de gestão térmica. O invólucro desenvolvido foi reduzido por uma razão de 2,3 no número de células em série e em paralelo em relação ao invólucro original, como se pode observar na Figura 4.2. Como tal, o caudal de entrada foi reduzido por essa razão, resultando assim um valor de caudal de 17,4 l/min.

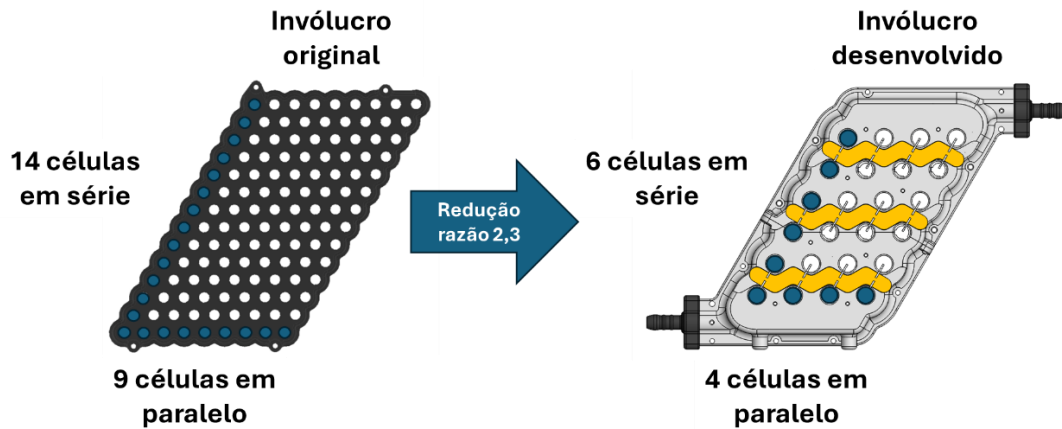


Figura 4.2 – Esquemático simplificado da redução do invólucro desenvolvido em relação ao original

No sistema de gestão térmico final do veículo existem três invólucros idênticos, cujas entradas de fluido são feitas em paralelo (Figura 4.3). Isto significa que podemos assumir uma perda de carga igual para os 3 módulos, o que significa que o caudal total do sistema distribuir-se-á de igual forma pelos três módulos. Dividindo o valor de 17,4 l/min por três obteve-se o valor de caudal usado no modelo CFD do caso de estudo: 5,8 l/min.

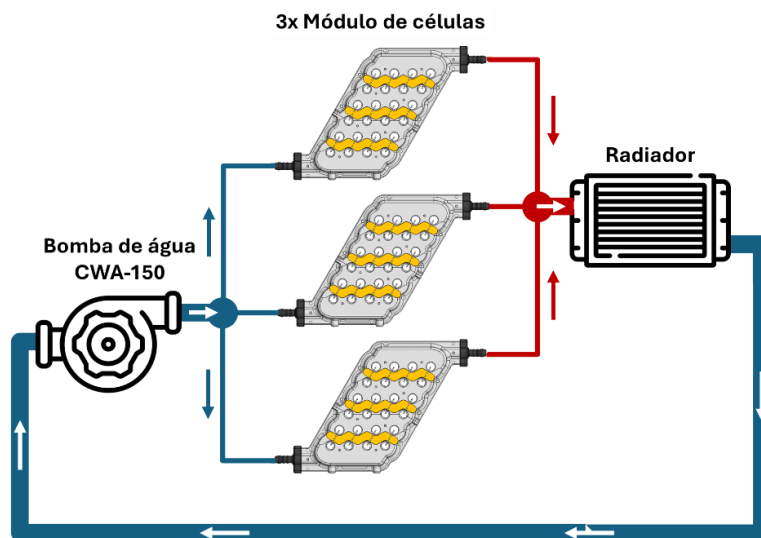


Figura 4.3 – Esquemático simplificado das ligações do fluido de refrigeração no veículo

No entanto, durante o processo de construção da montagem experimental, na qual foi usado um equipamento de banho térmico para controlo do caudal e da temperatura do fluido dielétrico, verificou-se que a bomba interna do banho térmico não teria a capacidade de fornecer 5,8 l/min de caudal à montagem desenvolvida. Assim sendo, foi necessário realizar o ensaio experimental usando o ponto equivalente ao ponto de pressão mais elevada da bomba CWA-150, isto é 1,74 l/min. O valor de 1,74 l/min representa o ponto de pressão mais elevada da bomba CWA-150 da mesma forma que 5,8 l/min representa o ponto de caudal mais elevado da bomba CWA-150.

A alteração do valor de caudal significou que não foi possível avaliar o valor de potencial queda de pressão mais elevado no interior do módulo, o que só seria possível realizando o ensaio com o caudal de 5,8 l/min. No entanto, ao realizar o ensaio experimental com caudal de 1,74 l/min, será possível avaliar o pior cenário na perspetiva da temperatura das células, uma vez que a renovação de líquido fresco no interior do invólucro irá ocorrer a uma frequência mais baixa. Como tal, será expectável que se observem temperaturas mais elevadas nas células.

Todavia, para o estudo de dependência de malha foi usado o caudal de 5,8 l/min, uma vez que este caudal representa o pior cenário da perspetiva do escoamento do fluido, sendo expectável que este caudal resulte numa quantidade mais elevada de perdas no interior do invólucro.

A temperatura de 25 °C foi selecionada para a entrada de fluido por ser um valor de temperatura para a qual já existiam resultados experimentais para a resposta térmica da célula.

Por fim, o *C-Rate* de 4C, que foi configurada no modelo numérico da célula, foi homologamente usado nos ensaios experimentais, visto ser um valor que representa 40% do valor máximo de corrente que cada célula tem capacidade de fornecer e visto já existirem resultados de cálculo numérico e ensaios experimentais obtidos por Silva (P. B. Silva, 2023).

4.2.Desenvolvimento do invólucro

Seguindo a metodologia exposta em 2.1.3.7, o passo que sucede o estabelecimento das variáveis do problema na elaboração de um estudo CFD passa pela elaboração do modelo

CAD do volume de fluido que será analisado. Existia já uma versão do invólucro desenvolvida (Figura 4.4), a qual procurava conter as células e o fluido usando o menor volume possível. Numa fase inicial do presente trabalho, existiram múltiplas tentativas de modelar numericamente o referido invólucro.

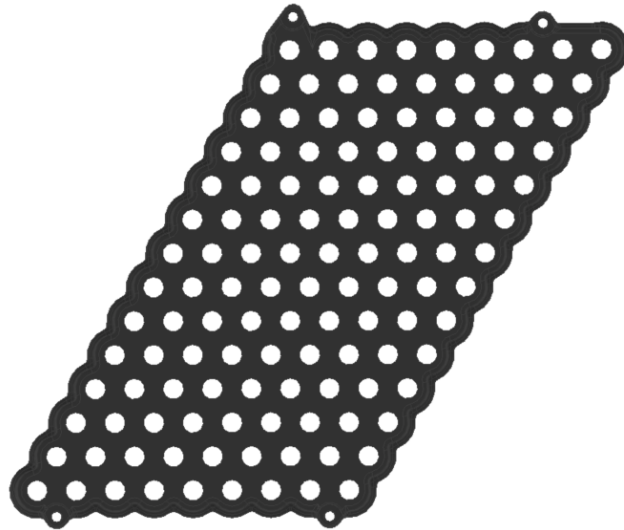


Figura 4.4 – Invólucro original desenvolvido na empresa parceira

No entanto, características geométricas do mesmo, nomeadamente áreas de passagem do fluido muito reduzidas entre células, levaram a que não fosse possível gerar uma malha inicial para a elaboração do estudo CFD. O módulo original também usa uma configuração 14s9p, o que resultaria num número total de 126 células. Este número elevado de células resultaria num custo alto de produção do módulo, nomeadamente tendo em consideração o objetivo de projeto nesta fase que pode igualmente ser cumprido com modelos de menor dimensão.

Tendo os referidos fatores em conta, foi decidido criar e desenvolver um novo invólucro, o qual procurou manter as principais características geométricas do invólucro já desenvolvido, mas introduzindo novas estruturas de apoio à gestão térmica e refinando aspetos do invólucro original.

O veículo onde o bloco de células completo será integrado possui um compartimento para a bateria (*casing*) que contém os módulos de células. A geometria do referido *casing* encontra-se ilustrada na Figura 4.5. Tendo em conta as características geométricas do invólucro original, que já havia sido construído com as dimensões deste *casing*, foram replicadas no

invólucro desenvolvido no âmbito deste trabalho a inclinação e a distância entre células do invólucro da Figura 4.4.



Figura 4.5 – Geometria do *casing* que contém os módulos aplicado no veículo

O invólucro original (Figura 4.4) não possuía qualquer tipo de câmara, ou coletor, de equilíbrio de pressão, quer à entrada, como à saída. Este foi um dos pontos que se procurou melhorar no invólucro desenvolvido para o presente trabalho, uma vez que uma estrutura deste tipo permite atingir maior uniformidade na distribuição do fluido nas passagens entre células. O desenvolvimento desta estrutura encontra-se abordado em maior detalhe na subsecção 4.2.1.

Procurou-se também avaliar o efeito do comprimento dos apoios (Figura 4.6) das células nas temperaturas das células. A análise da influência do comprimento destas estruturas encontra-se abordada em maior detalhe na subsecção 4.2.2.

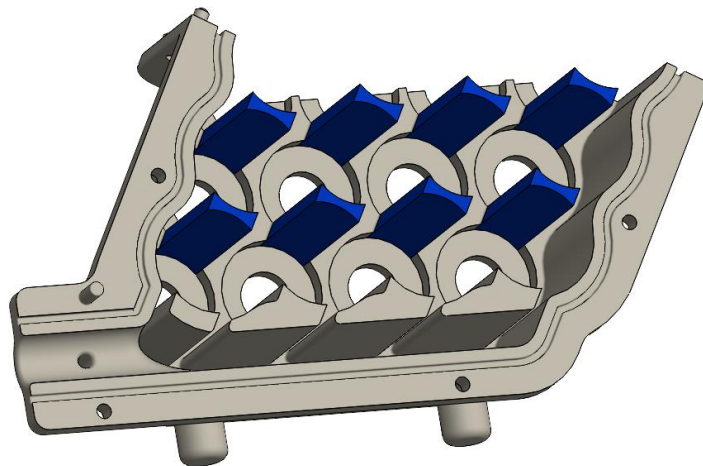


Figura 4.6 – Localização dos apoios de célula, apenas um quarto do invólucro representado

Por fim, de forma a manter o custo de produção do protótipo o mais baixo possível, optou-se por construir um invólucro que contém uma montagem 6s4p. Esta montagem representa cerca de metade do número de células em série e paralelo do protótipo, o que significa que as passagens de fluido possuem cerca de metade do comprimento que teriam num invólucro com capacidade para uma montagem 14s9p. Tal como referido na secção 4.1, esta redução do invólucro desenvolvido em relação ao original, resultou numa redução equivalente no caudal de fluido configurado no modelo CFD. A versão final do invólucro desenvolvido encontra-se ilustrada na Figura 4.7.

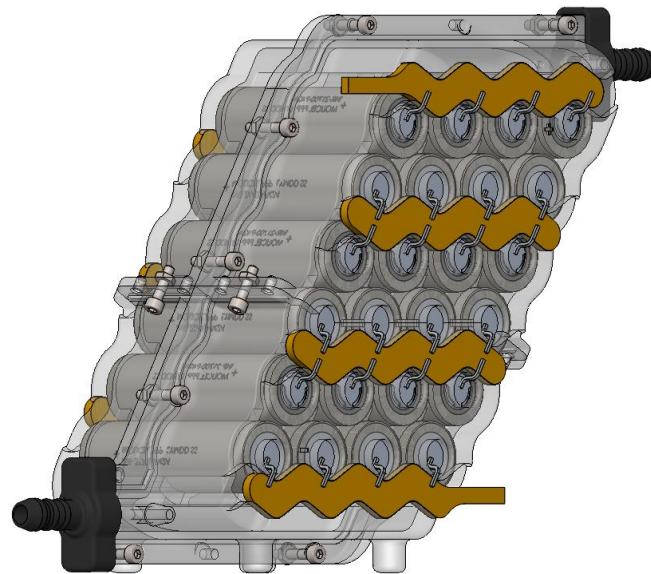


Figura 4.7 – Versão final do invólucro desenvolvido

4.2.1. Otimização das câmaras de equilíbrio de pressão

A introdução de câmaras de pressão (Figura 4.8) no módulo desenvolvido teve como principal objetivo a homogeneização do caudal de fluido ao longo de todo o invólucro. Num invólucro sem este tipo de estruturas seria sempre expectável um maior desequilíbrio de quantidade de caudal nos diversos canais de fluido entre células. É importante salientar que, durante esta fase, os apoios de células identificados na Figura 4.6 estendiam-se até ao plano de simetria do invólucro.

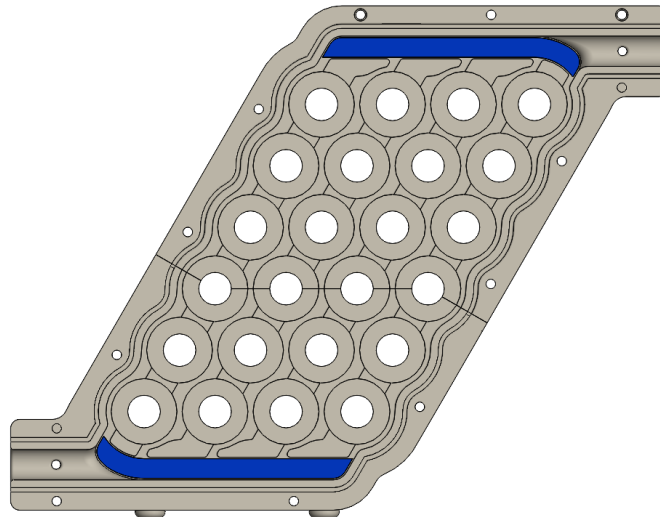


Figura 4.8 – Vista de topo das camaras de pressão desenvolvidas no invólucro

O processo de otimização desta estrutura significou avaliar o equilíbrio do perfil de pressão ao longo do invólucro e o equilíbrio de caudais entre os diferentes canais entre as células (Figura 4.9).

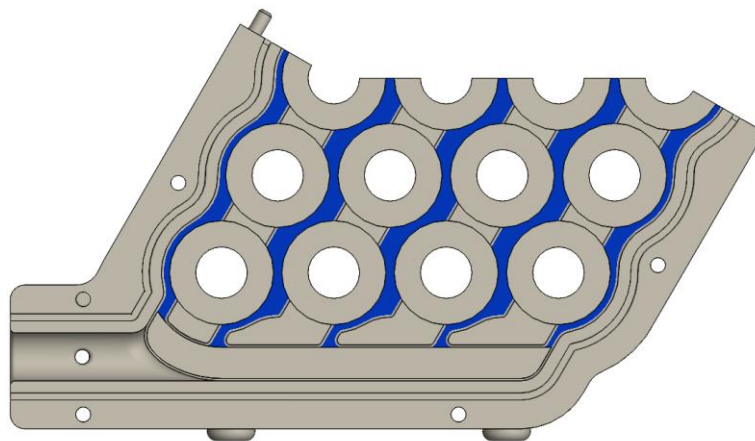


Figura 4.9 – Vista de topo dos canais de fluido entre as células

Para tal, as passagens identificadas com A, B, C, D e F na Figura 4.10 foram alvo de um processo iterativo de redefinição de geometria. Durante este processo procurou manter-se a passagem F com a menor dimensão e a passagem A com a maior dimensão, isto devido à direção e posição da entrada de fluido no invólucro, ou seja, com o objetivo de ter perdas de carga semelhantes para a entrada de cada canal.

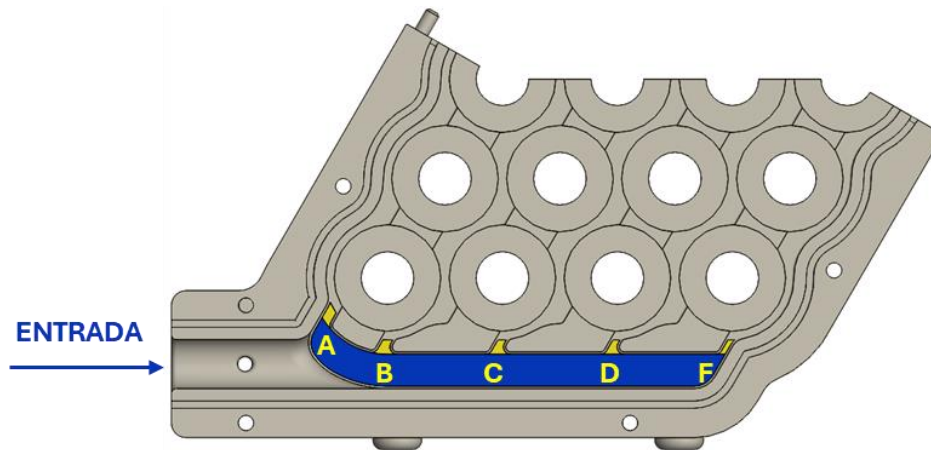


Figura 4.10 – Vista de topo dos pontos de passagem da câmara de pressão para os canais de fluido entre células

Uma vez que a passagem F é a passagem mais afastada da entrada do fluido, e que o fluido entra com uma direção quase perpendicular às passagens, seria essa mesma entrada F que iria receber maior caudal de fluido se se assumisse que todas as passagens possuiriam a mesma dimensão. O processo de otimização da câmara de equilíbrio de pressão foi dado como concluído após ter sido obtido um perfil de pressões equilibrado ao longo de todas as passagens entre células, bem como uma distribuição de caudal entre todos os canais entre células aceitável. Todos os modelos numéricos usados para otimizar as referidas estruturas foram configurados de forma mais simples que o modelo final do caso de estudo, tendo sido incluído na malha do modelo apenas o volume de fluido. As configurações dos modelos CFD usados nesta fase encontram-se resumidas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Configurações dos modelos de otimização das câmaras de equilíbrio de pressão

Geral		
Regime temporal	Permanente	
Modelos		
Modelos ativos	Turbulência ($k-\omega$)	
Materiais		
Material do fluido	Densidade	916 kg/m ³
	Calor específico	1906 J/kg·K
	Viscosidade	0,015 kg/m·s
Condições de fronteira		
Entrada	Caudal	0,0884 kg/s
Saída	Pressão	0 Pa
Paredes internas	Condições de escorregamento	Sem escorregamento

Todos os modelos elaborados para a validação da geometria das camaras de pressão seguiram a metodologia exposta em 2.1.3.7, tal como já havia sido feito no modelo do caso de referência. Isto significa que, após definidas as condições do modelo, a etapa seguinte do processo de elaboração do estudo CFD passou por realizar o estudo de dependência de malha. Para este estudo de dependência de malha foi adotada uma estratégia em tudo semelhante à usada no estudo de dependência de malha exposto em 3.2.1. No caso do presente estudo, foram recolhidos os valores de velocidade do fluido em seis pontos, cuja localização se encontra representada na Figura 4.11. Os pontos referidos foram aplicados sobre o plano de simetria geométrica do invólucro.

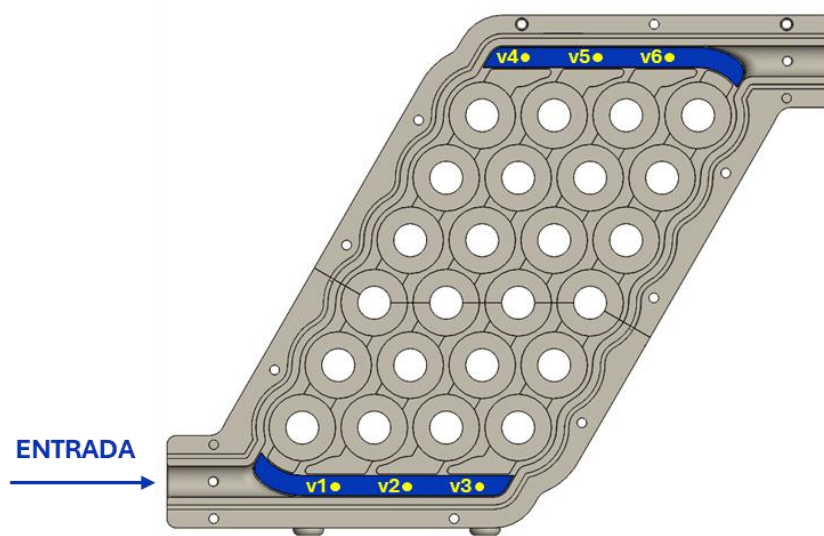


Figura 4.11 – Pontos de monitorização de velocidade de fluido para o estudo de dependência de malha da otimização das camaras de pressão

O gráfico da Figura 4.12 contém o resultado do estudo de dependência de malha para a geometria das camaras de pressão que apresentou os melhores resultados de distribuição de pressões e caudal.

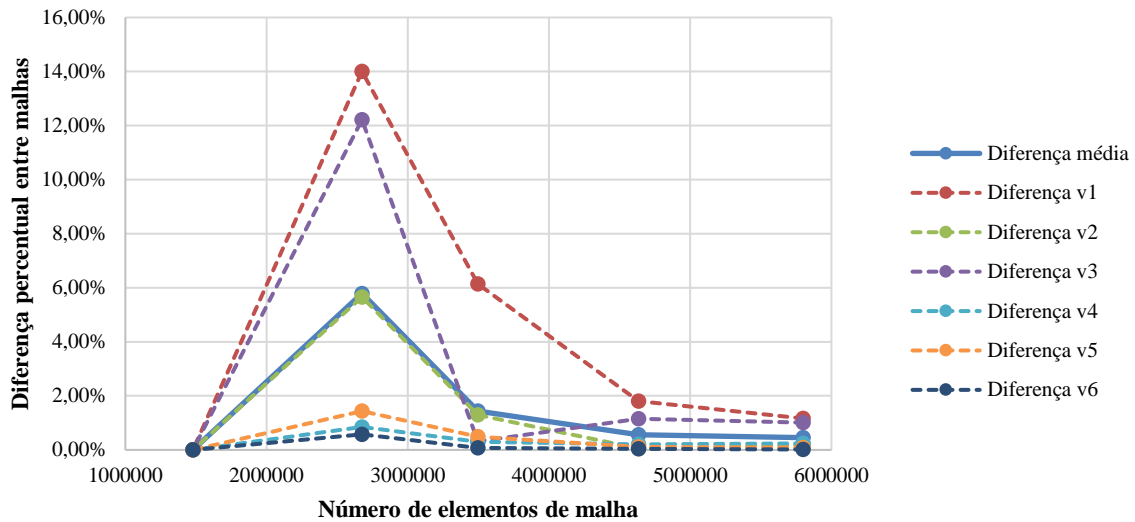


Figura 4.12 – Resultados do estudo de dependência de malha para a otimização das camaras de pressão com caudal de entrada de 0,0884 kg/s

O perfil de pressões final, obtido do modelo gerado a partir da malha com o número mais elevado de elementos no gráfico exposto acima, apresenta diferenças que se consideraram aceitáveis, por conduzirem a valores de caudal nos respetivos canais muito próximos. Tal como se pode observar na Figura 4.13, o perfil de pressões apresenta boa homogeneidade dentro das camaras de pressão e ao longo dos canais de passagem de fluido entre as células, o que desde logo indica uma boa distribuição de caudal entre todas as passagens do módulo.

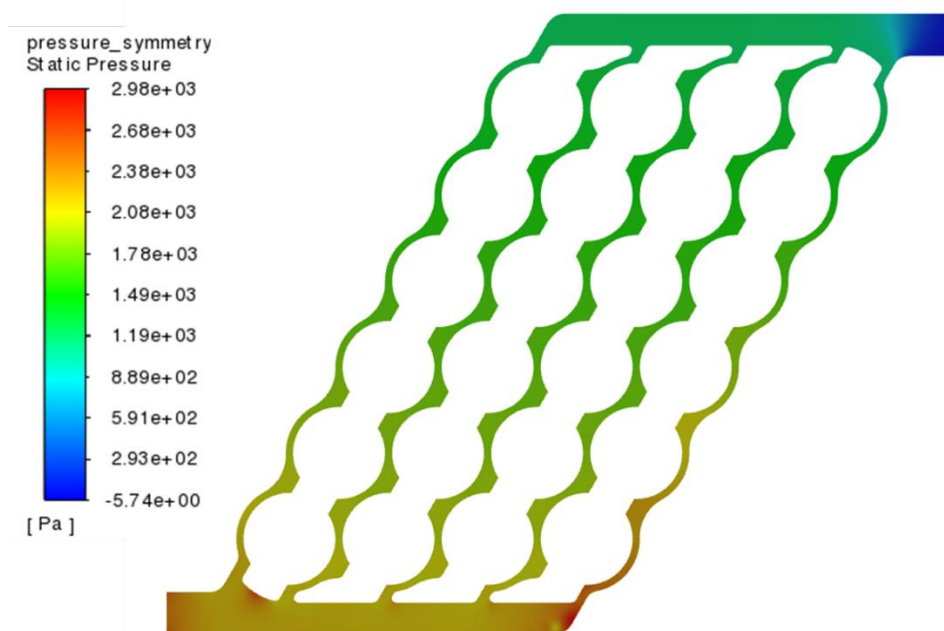


Figura 4.13 – Perfil de pressões final obtido ao longo do plano de simetria do invólucro com caudal de entrada de 0,0884 kg/s

Os valores de caudal de fluido, medidos em cada um dos canais alimentados pelas passagens A, B, C, D e F da Figura 4.10, confirmaram o equilíbrio de distribuição de fluido já indicado pelo perfil de pressão exposto na Figura 4.13. Com as condições do caso de estudo (Tabela 4.1) foi possível obter uma distribuição do caudal de entrada de cerca de 22% a atravessar cada um dos canais centrais (B, C e D da Figura 4.10) e 15% e 18% para os canais A e F da Figura 4.10, respetivamente. Os valores de caudal medidos no modelo em todos os locais referidos apresentam-se com maior detalhe na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores dos caudais medidos em cada canal entre células após otimização das passagens com caudal de entrada de 0,0884 kg/s

Canal	Caudal por canal	% do caudal total
A	0,013341968 kg/s	15,09%
B	0,019615654 kg/s	22,19%
C	0,019461768 kg/s	22,02%
D	0,019519365 kg/s	22,08%
F	0,016301434 kg/s	18,44%
Somatório	0,088240188 kg/s	99,82%
Caudal total		0,0884 kg/s

Esta distribuição de caudal foi considerada aceitável, uma vez que o fluido que irá atravessar os canais centrais B, C e D da Figura 4.10 está em contacto com aproximadamente o dobro da área de superfície de células, quando comparado aos canais A e F da Figura 4.10.

Como passo adicional de validação do dimensionamento das camaras de pressão e zonas adjacentes, foi modelado numericamente um cenário semelhante, mas onde foi aplicado à entrada um caudal mássico de 0,0266 kg/s. Por sua vez, os valores de caudal mássico que atravessam cada canal alimentado pelos pontos indicados na Figura 4.10, encontram-se expostos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valores dos caudais medidos em cada canal entre células após otimização das passagens com caudal de entrada de 0,0226 kg/s

Canal	Caudal por canal	% do caudal total
A	0,0039377 kg/s	14,80 %
B	0,00610072 kg/s	22,94 %
C	0,00612854 kg/s	23,04 %
D	0,00620163 kg/s	23,31 %
F	0,00416555 kg/s	15,66 %
Somatório	0,02653413 kg/s	99,75 %
Caudal total		0,0266 kg/s

Nos valores da Tabela 4.4 é possível observar uma distribuição de caudal pelos canais entre as células muito semelhante à distribuição observada na Tabela 4.3. De notar que, quando foi aplicado o caudal mais baixo no invólucro, as consequentes velocidades mais baixas no interior do invólucro tornam a distribuição de caudais ainda mais próxima do ideal, tendo em conta a área de contacto que o fluido tem com as células, dependendo do canal que este atravessa.

Tendo sido obtidos resultados satisfatórios em termos de pressão e caudais para a geometria das camaras de pressão, procedeu-se de seguida à otimização dos apoios das células, processo que se encontra descrito em detalhe na subsecção seguinte.

4.2.2. Otimização dos apoios de célula

Dado como concluído o processo de otimização das camaras de equilíbrio de pressão, foi de seguida realizada a otimização do comprimento dos apoios de cada célula. Esta análise/otimização teve como objetivo identificar qual o tipo de apoios que resultaria em valores de temperatura de célula menores, bem como numa aproximação do valor máximo e mínimo de temperatura observado nas células. De forma a avaliar a diferença entre as duas soluções, apoios longos que se estendem até ao plano de simetria (Figura 4.14 à esquerda) ou apoios curtos (Figura 4.14 à direita), foi realizada uma nova análise numérica.

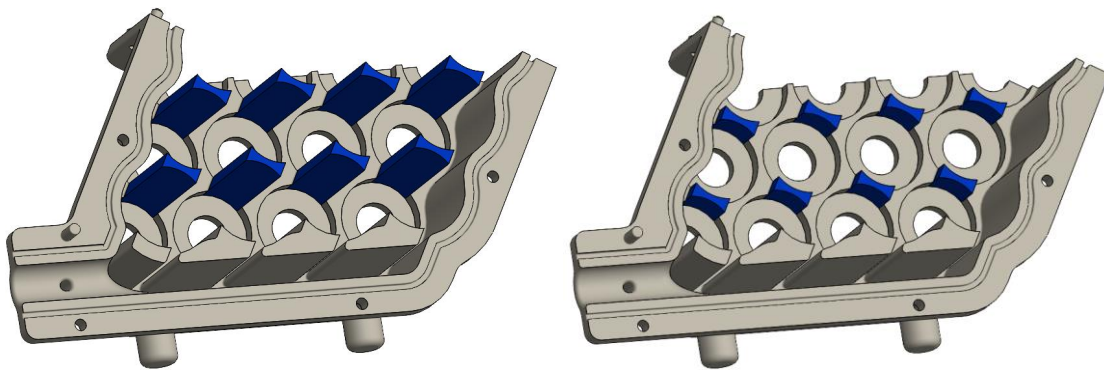


Figura 4.14 – Esquerda: Apoios de célula longos; Direita: Apoios de célula curtos

Tal como em todos os estudos CFD já apresentados, o passo seguinte do processo de otimização passou por realizar o estudo de dependência de malha. Neste processo foi necessário realizar dois estudos de dependência de malha, uma vez que o objetivo foi verificar as diferenças que duas geometrias distintas poderiam, ou não, ter nas temperaturas

das células. Os resultados do estudo de dependência de malha para a geometria com apoios longos apresentam-se na Figura 4.15, enquanto os resultados do estudo de dependência de malha para a geometria com apoios curtos se apresentam na Figura 4.16. Tal como no estudo de dependência de malha do processo de otimização das camaras de pressão, foram recolhidos os valores de velocidade nos pontos indicados na Figura 4.11 para a realização do referido estudo.

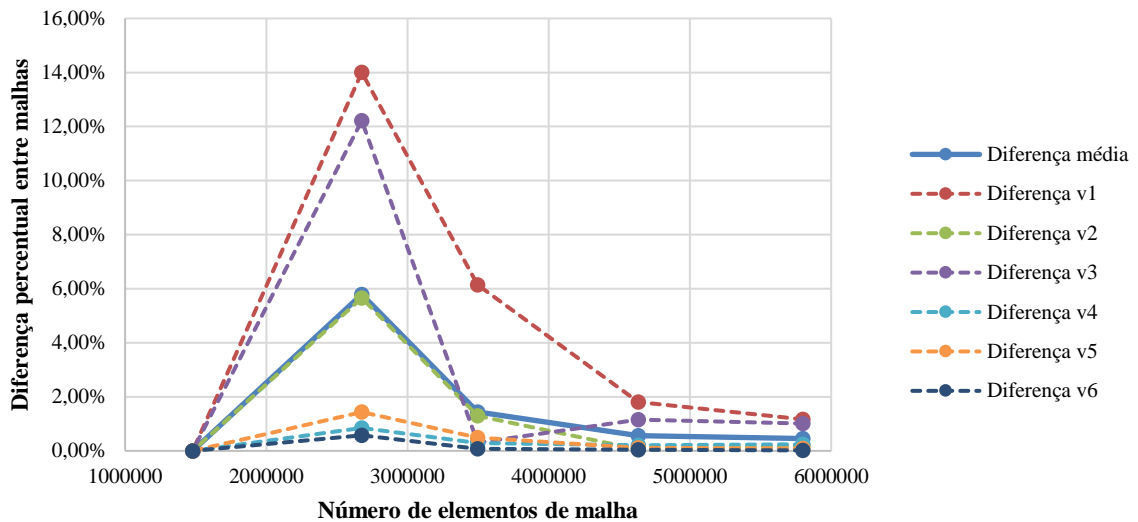


Figura 4.15 – Resultados do estudo de dependência de malha para a geometria com apoios de célula longos e caudal de entrada de 0,0884 kg/s

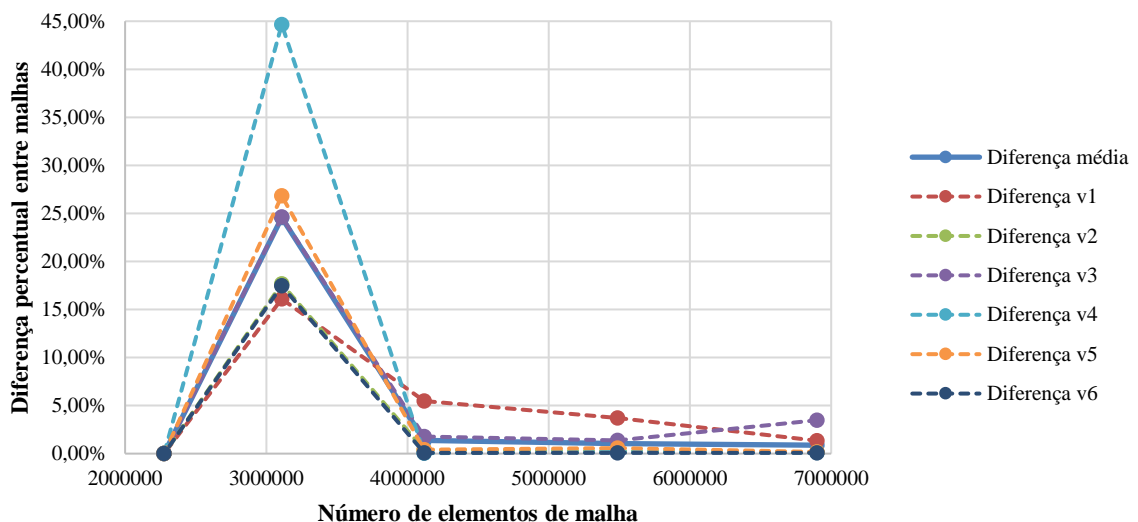


Figura 4.16 – Resultados do estudo de dependência de malha para a geometria com apoios de célula curtos e caudal de entrada de 0,0884 kg/s

Conforme ilustrado, é possível verificar que para um número de elementos superior a 5 milhões, os resultados têm variações, em ambos os casos, inferiores a cerca de 2% com o aumento do número de elementos. Assim, foi considerado este o valor mínimo do número de elementos a considerar nas simulações subsequentes.

Tendo concluído o estudo de dependência de malha para cada uma das geometrias, prosseguiu-se com o estudo CFD em conjunto com a implementação de sólidos cilíndricos (células) para se considerar o calor gerado pelas células de forma mais simplificada. Nesta simplificação foi assumido que as células mantinham a sua resistência interna ao longo do processo de descarga e que cada uma destas estava a ser descarregada a um *C-Rate* de 4C. De acordo com a Lei de Ohm, assim como o volume de cada célula e a sua resistência interna típica indicada pelo fabricante (13 mΩ), foi estimada uma taxa de geração de calor volumétrica de 165640 W/m³ para cada célula nas condições referidas. O valor da taxa de geração de calor volumétrica foi calculado recorrendo às equações (4.1) e (4.2).

$$Potência [W] = Resistência\ interna [\Omega] \cdot Corrente^2 [A] \quad (4.1)$$

$$Taxa\ de\ geração\ de\ calor \left[\frac{W}{m^3} \right] = \frac{Potência [W]}{Volume\ de\ célula [m^3]} \quad (4.2)$$

As restantes configurações dos modelos CFD usados para a otimização dos apoios de célula encontram-se expostos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Configurações dos modelos de otimização dos apoios de células

Geral		
Regime temporal	Permanente	
Modelos		
Modelos ativos	Turbulência (<i>k-ω</i>) e Energia	
Materiais		
Material do fluido	Densidade	916 kg/m ³
	Calor específico	1906 J/kg·K
	Condutividade térmica	0,129 W//m·K
	Viscosidade	0,015 kg/m·s
Material das células	Densidade	7600 kg/m ³
	Calor específico	450 J/kg·K
	Condutividade térmica	12 W/m·K

Condições de fronteira		
Entrada	Caudal	0,0884 kg/s
	Temperatura	25 °C
Saída	Pressão	0 Pa
Volumes de células	Fonte de energia	165640 W/m ³
Paredes internas	Condições de escorregamento	Sem escorregamento
	Condições térmicas	Acopladas térmicamente

Os valores de temperatura obtidos nas simulações CFD onde se considerou a geometria com apoios longos, variam de uma temperatura máxima de 30,7 °C a uma temperatura mínima de 26,4 °C, o que resultou numa diferença máxima de temperaturas de 4,3 °C. Por sua vez, os valores obtidos na geometria com apoios curtos revelaram que as células atingiram uma temperatura máxima de 29,6 °C e uma temperatura mínima de 26,1 °C, o que resultou numa diferença máxima de temperaturas de 3,5 °C. Tendo em consideração os valores obtidos, concluiu-se que a geometria com apoios curtos é a mais indicada para ser aplicada na geometria final.

De forma a gerar mais dados para suportar a escolha da geometria com apoios curtos, foram elaborados dois novos estudos CFD. Estes dois novos modelos foram construídos com características idênticas às originais deste processo, que se apresentam na Tabela 4.5. Tal como já havia sido realizado no processo de otimização das câmaras de equilíbrio de pressão, a única alteração nas características dos modelos foi o caudal de entrada, que passou a ser 0,0266 kg/s, como forma de representar o cenário em que a bomba CWA-150 estaria a produzir o seu valor de pressão mais alto e, por conseguinte, um caudal menor.

Para os novos modelos foram retirados, de novo, os valores de temperatura máxima e mínima observados nas células. Para a geometria com apoios longos e caudal de entrada de 0,0266 kg/s obtiveram-se valores de temperatura máxima de 33,2 °C e temperatura mínima de 27,9 °C, o que resultou numa diferença de temperaturas de 5,3 °C. Por sua vez, na geometria com apoios curtos o valor de temperatura máxima foi de 31,3 °C e o valor de temperatura mínima foi de 27,5 °C, o que resultou numa diferença de temperatura de 3,8 °C.

Tabela 4.6 – Tabela de resultados da otimização dos apoios de células

Caudal	Apoios	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Diferença
0,0884 kg/s	Longos	30,7 °C	26,4 °C	4,3 °C
	Curtos	29,6 °C	26,1 °C	3,5 °C
0,0226 kg/s	Longos	33,2 °C	27,9 °C	5,3 °C
	Curtos	31,3 °C	27,5 °C	3,8 °C

Como é possível observar pelos resultados compilados na Tabela 4.6, a geometria com apoios curtos mostrou um melhor desempenho do ponto de vista de dissipação de calor e homogeneização de temperaturas do que a geometria com apoios longos, tanto no cenário de caudal de fluido mais elevado como no cenário de caudal mais reduzido. De notar ainda que, enquanto a geometria com apoios longos permitiu que a diferença de temperaturas aumentasse 1 °C, quando o caudal foi reduzido, na geometria com apoios curtos a diferença de temperaturas apenas aumentou 0,3 °C. Tendo em consideração estes resultados, foi decidido adotar a geometria de apoios de célula curtos para a construção da versão final do invólucro.

4.2.3. Desenvolvimento das zonas de fixação das busbars

Tal como mencionado na subsecção 2.1.1.3, as células eletroquímicas por si só não possuem a capacidade de alimentar sistemas com maiores requisitos de tensão e corrente. De forma a viabilizar o uso desta tecnologia em sistemas de acumulação de energia são usadas montagens de células em série e paralelo.

No caso do módulo desenvolvido foi selecionada uma montagem 6s4p (seis células em série e quatro em paralelo), pelas razões já abordadas em 4.1. Para que fosse possível realizar as ligações necessárias, recorreu-se ao uso de *busbars*, componentes construídos a partir de alumínio ou cobre, desenhados com o propósito de ligar células eletroquímicas nos acumuladores de energia.

Para que o invólucro tivesse capacidade de acomodar estes componentes, foi necessário criar as estruturas ilustradas na Figura 4.17. Estas estruturas foram construídas de forma assimétrica no invólucro, de forma a ser possível realizar as ligações em série/paralelo necessárias.

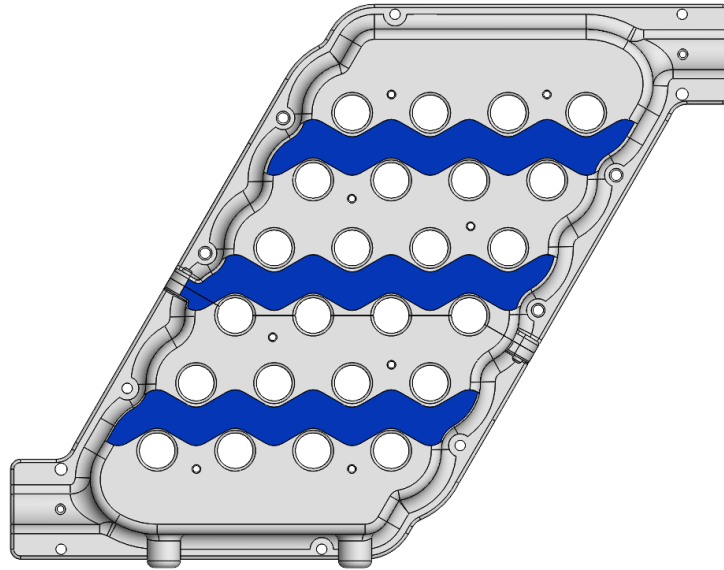


Figura 4.17 – Zonas de colagem de busbars

De forma a completar as ligações em série/paralelo necessárias no bloco de células, recorreu-se também a um processo de *wirebonding* (Figura 4.18), o qual permitiu realizar as ligações entre as células e entre busbars e células. O processo de *wirebonding* é muito usado na soldadura de blocos de células, visto que o seu princípio de soldadura por vibrações de alta frequência não gera calor durante o processo de soldadura.



Figura 4.18 – Processo de soldadura *wirebonding*

4.2.4. Sensores e pontos de medição

Após terem sido determinados os pontos de interesse para medição de variáveis (pressão e temperatura), procedeu-se à criação de estruturas no invólucro que permitissem a aplicação dos respetivos sensores necessários.

Para os testes experimentais foi determinado que seria vantajoso realizar a leitura constante da queda de pressão entre a entrada e a saída do invólucro. Assim sendo, as estruturas identificadas na Figura 4.19 foram criadas de forma a facilitar a ligação de tomadas de pressão nos pontos identificados.



Figura 4.19 – Estrutura de tomada de pressão

Tendo em conta os resultados de temperatura observados ao longo de todas as simulações numéricas, foi decidido usar um total de 10 sensores de temperatura distribuídos por todo o invólucro. Dois destes sensores foram aplicados na entrada e saída do invólucro, enquanto os restantes foram aplicados nos pontos identificados na Figura 4.20. Os oito sensores de temperatura aplicados nas posições apontadas na Figura 4.20 foram aplicados nos polos negativos das células, visto serem o ponto onde foi possível garantir que o sensor de temperatura estaria em contacto direto com a superfície da célula.

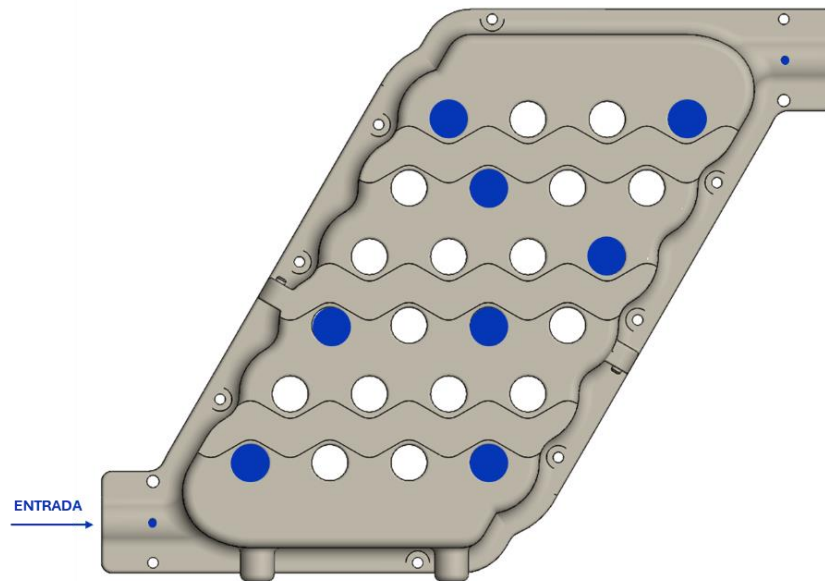


Figura 4.20 – Pontos de medição de temperatura e identificação das células relevantes

4.3.Métodos numéricos

Tendo as condições do problema estabelecidas e o modelo do volume de controlo elaborado, o passo seguinte consistiu na realização de um estudo CFD, mais uma vez de acordo com a metodologia exposta em 2.1.3.7. Assim, o processo de elaboração do modelo CFD iniciou-se pelo estudo de dependência de malha para o presente caso de estudo, exposto na subsecção 4.3.1. Depois de concluído o estudo de dependência de malha foi construído o modelo CFD final, cujas características são apresentadas na subsecção 4.3.2

4.3.1. Estudo de dependência de malha no caso de estudo

Durante o estudo de dependência de malha foram adotadas algumas simplificações em relação ao modelo CFD final do caso de estudo. De forma mais concreta, para o estudo de dependência de malha foi apenas considerado o volume de fluido (Figura 4.21), uma vez que é apenas este o volume de interesse para o estudo da dependência de malha, e não o volume representativo das células.

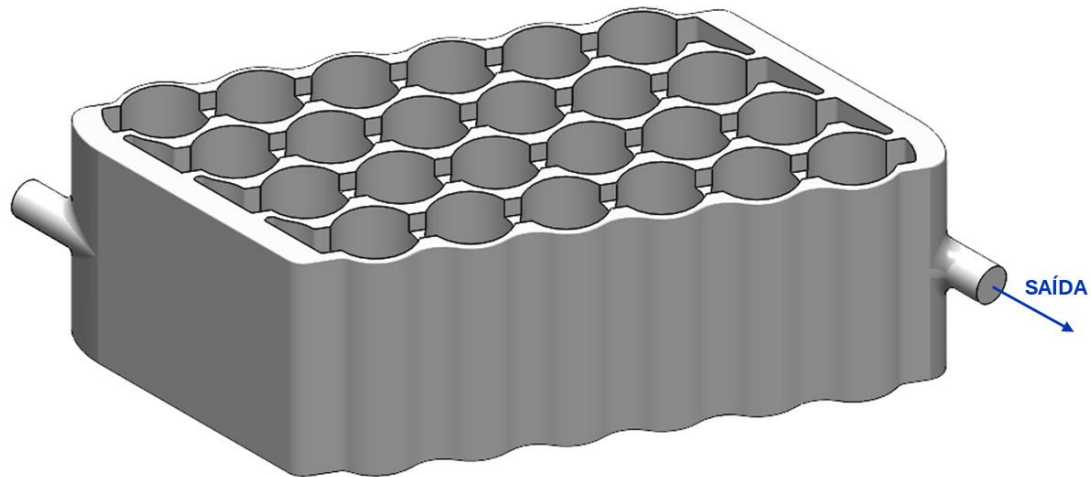


Figura 4.21 – Geometria simplificada para o estudo de dependência de malha para o caso de estudo

As restantes configurações dos modelos usados no estudo de dependência de malha encontram-se resumidas na Tabela 4.7. Por sua vez, os resultados do estudo de dependência de malha apresentam-se na subsecção 5.1.

Tabela 4.7 – Configurações dos modelos do estudo de dependência de malha para o caso de estudo

Geral		
Regime temporal	Permanente	
Modelos		
Modelos ativos	Turbulência ($k-\omega$)	
Materiais		
Material do fluido	Densidade	916 kg/m ³
	Viscosidade	0,015 kg/m·s
Condições de fronteira		
Entrada	Caudal	0,0884 kg/s
Saída	Pressão	0 Pa

4.3.2. Simulação numérica (CFD) do caso de estudo

Após a conclusão do estudo de dependência de malha, prosseguiu-se com a realização de simulações numéricas do escoamento de acordo com a malha selecionada para o efeito. O modelo CFD final do caso de estudo incluiu configurações que, no processo anterior de estudo de dependência de malha, não haviam sido incluídos, nomeadamente a configuração

do regime transiente, da equação de energia e do modelo de célula MSMD. O conjunto total das configurações aplicadas neste estudo numérico “completo” apresenta-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Configurações do modelo CFD do caso de estudo

Geral		
Regime temporal	Transiente	
Modelos		
Modelos ativos	Energia, Turbulência ($k-\omega$) e Baterias	
Método de cálculo modelo de baterias	MSMD	
Modelo eletroquímico	NTGK	
Fontes de calor	Efeito de Joule nas zonas ativas e passivas e reações químicas	
Capacidade nominal da célula	4,2 Ah	
<i>C-Rate</i>	4C	
Tensão de corte inferior	3,1 V	
Tensão de corte superior	4,1 V	
Materiais		
Material do fluido	Densidade	916 kg/m ³
	Calor específico	1906 J/kg·K
	Condutividade térmica	0,129 W/m·K
	Viscosidade	0,015 kg/m·s
Material do invólucro	Densidade	1300 kg/m ³
	Calor específico	1400 J/kg·K
	Condutividade térmica	0,14 W/m·K
	Condutividade elétrica	1e-11 S/m
Material da zona ativa das células	Densidade	2092 kg/m ³
	Calor específico	678 J/kg·K
	Condutividade térmica	18,2 W/m·K
	Condutividade elétrica	UDS 0 = 1.19e+06
		UDS 1 = 9.83e+05
Material das zonas passivas (polos das células)	Densidade	8978 kg/m ³
	Calor específico	381 J/kg·K
	Condutividade térmica	387,6 W/m·K
	Condutividade elétrica	1e+07 S/m
Material das <i>busbars</i> e <i>wirebonding</i>	Densidade	2719 kg/m ³
	Calor específico	871 J/kg·K
	Condutividade térmica	202,4 W/m·K

	Condutividade elétrica	3,541e+07 S/m
Condições de fronteira		
Entrada	Caudal	0,0266 kg/s
	Temperatura	25 °C
Saída	Pressão	0 Pa
Paredes internas (células, invólucro e <i>busbars</i>)	Condições térmicas	Acopladas térmicamente
Paredes externas expostas ao ambiente	Condições térmicas	Transferência de calor por convecção (5 W/m ² ·K)

Na construção do modelo CFD final foram considerados todos os corpos necessários à análise do problema. Os referidos corpos incluíram o invólucro, as células, as *busbars* e o *wirebonding*. Como tal, a geometria sobre a qual se gerou a malha final foi algo distinta da geometria usada no estudo de dependência de malha, tal como se pode observar na Figura 4.22.

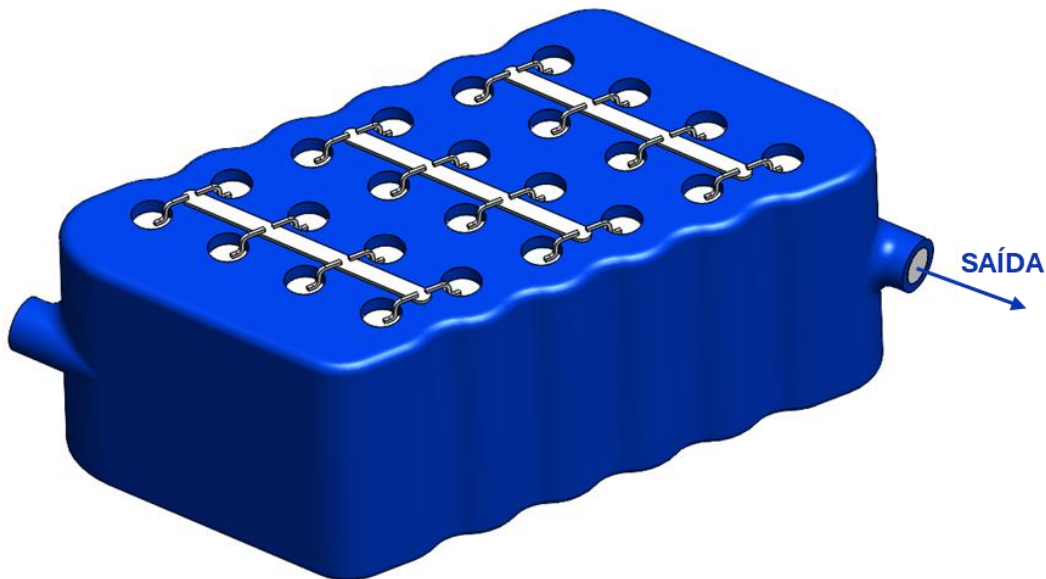


Figura 4.22 – Geometria completa usada na construção do modelo CFD final

No entanto é importante salientar que, durante a geração da malha final sobre a geometria exposta na Figura 4.22, garantiu-se que os parâmetros de dimensionamento da malha na zona de fluido seriam iguais aos usados na malha seleccionada após o estudo de dependência de malha para o caso de estudo.

O invólucro desenvolvido para o presente trabalho apresentou passagens de fluido de baixa espessura, sendo que as de menor dimensão distavam apenas 0,85 mm. Assim sendo, ainda durante o processo de estudo de dependência de malha, procurou-se que as malhas de maior número de elementos tivessem um parâmetro de malha suficiente para que existissem pelo menos dois elementos de malha nestas zonas, para além dos elementos considerados no refinamento junto ao sólido para estudo da camada limite. Na Figura 4.23 é possível observar o nível de refinamento obtida na malha de volume final.

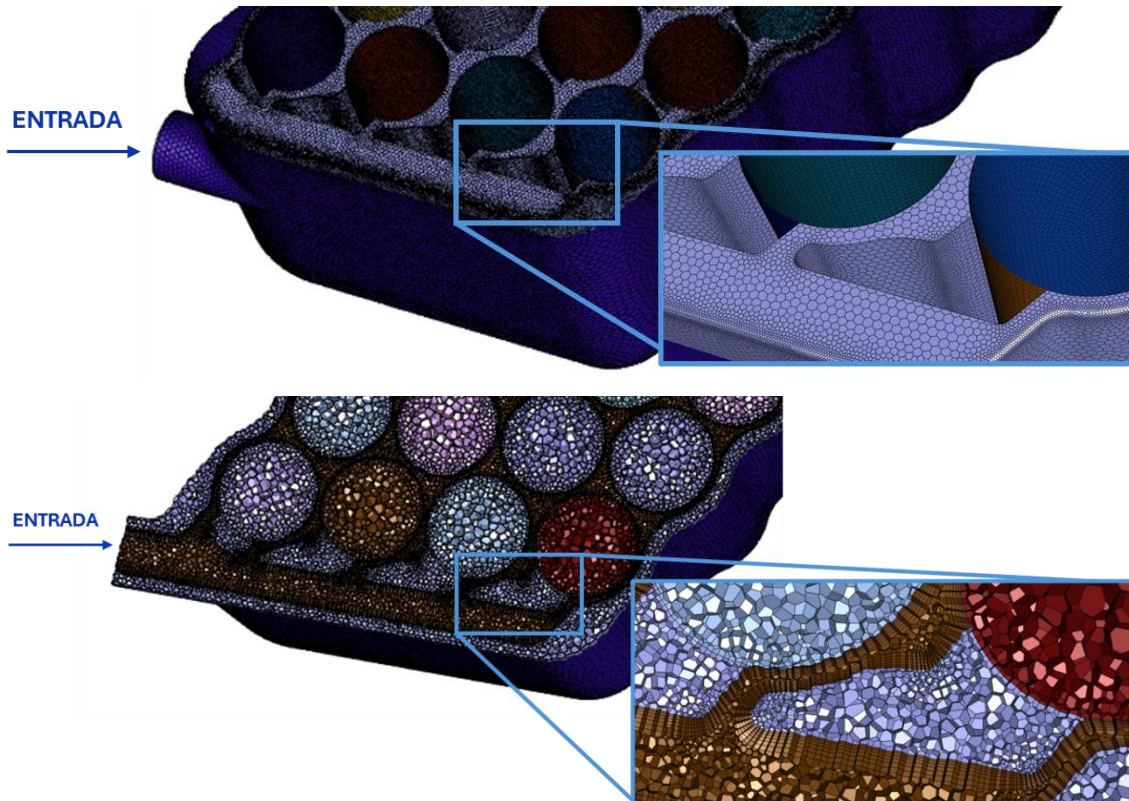


Figura 4.23 – Detalhe da granularidade da malha de superfície (cima) e malha de volume (baixo)

4.4. Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados

De forma a obter um maior versatilidade na montagem de recolha de dados, foi desenvolvido um sistema eletrónico de aquisição, tratamento e compilação de dados, que se encontra ilustrado na Figura 4.24.

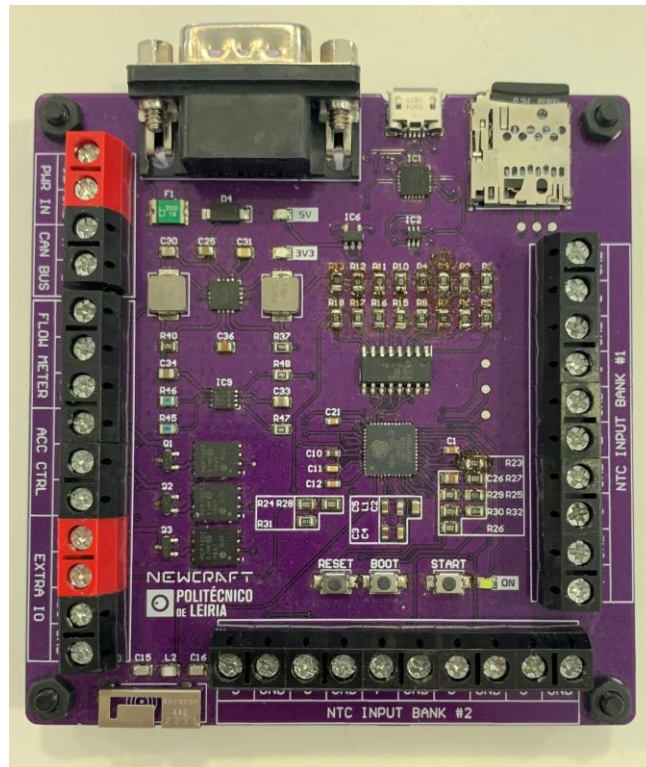


Figura 4.24 – Circuito eletrónico de aquisição de dados desenvolvido

O desenvolvimento do referido sistema eletrónico decorreu em duas fases distintas: a primeira fase de desenvolvimento de *hardware*, e a segunda fase de desenvolvimento do *firmware*, o qual foi implementado no *hardware* desenvolvido. As duas subsecções seguintes, 4.4.1 e 4.4.2, apresentam os passos e os resultados destas fases de desenvolvimento de *hardware* e *firmware*, respetivamente.

4.4.1. Desenvolvimento de *hardware*

O sistema eletrónico desenvolvido encontra-se dividido em três grupos: aquisição, processamento e compilação/transferência da informação recolhida. No grupo de aquisição de dados temos presente os pontos de ligação dos sinais ou *headers* (blocos de cor preta na Figura 4.24), os circuitos de condicionamento da tensão do sinal de entrada (divisores de tensão), bem como um circuito integrado (MCP3008) que realiza a leitura dos sinais analógicos (sensores de temperatura, sensores de pressão e sensor de caudal) e converte os sinais analógicos em informação digital. À exceção do circuito integrado anteriormente referido, todas as restantes estruturas são fundamentais num sistema de aquisição de sinais, pois só com eles é possível que os sinais dos sensores sejam lidos de forma segura pelo

microcontrolador. No caso do circuito desenvolvido surgiu a necessidade de implementar o circuito integrado de leitura/conversão de sinais, devido ao elevado número de sinais a adquirir (o circuito tem a capacidade de ler até 12 sinais distintos).

No grupo do processamento de informação temos um microcontrolador de 32 bits, o qual tem como principais funções:

- a leitura de sinais analógicos (sensor de pressão, sensores de temperatura e sensor de caudal).
- A receção de informação oriunda do circuito integrado MCP3008; o processamento de toda a informação recolhida.
- O armazenamento e exibição da informação tratada.

Todas estas tarefas são fulcrais para a correta monitorização e processamento de informação pós recolha de dados. Existindo uma lista extensa de tarefas que foi necessário realizar de forma fiável e ágil, o microcontrolador ESP32 foi selecionado como unidade computacional, devido às suas capacidades de processamento, bem como devido à familiaridade com o mesmo.

Uma vez que foi necessário medir temperaturas, caudal e diferencial de pressão entre a entrada e saída do módulo, foi necessário seleccionar sensores que tivessem a capacidade de medir as grandezas referidas de forma fiável.

Para medir o diferencial de pressão entre a entrada e saída do módulo protótipo desenvolvido seleccionou-se o sensor de pressão diferencial MPX5010DP (Figura 4.25) da marca NXP, que foi aplicado nas estruturas identificadas na Figura 4.19.



Figura 4.25 – Sensor de pressão diferencial MPX5010DP da marca NXP, adaptado de (DigiKey, 2024a)

Para a medição de temperaturas foram usados os sensores NTC (*Negative Temperature Coefficient*), com referência NTCLE305E4103SBA da marca Vishay. Foi decidido usar um sensor NTC com terminação com *epoxy* (Figura 4.26) devido à sua dimensão reduzida, o que permitiu integrar estes sensores nos locais necessários.



Figura 4.26 – Sensor de temperatura NTCLE305E4103SBA, adaptado de (DigiKey, 2024b)

Para medir o caudal do escoamento foi aplicado o sensor YF-S201 (Figura 4.27) no circuito de fluido. Segundo a ficha técnica do mesmo, este sensor tem capacidade de medir de 1 a 30 l/min e suporta uma pressão máxima de 2 MPa. Para além disso este sensor opera com uma tensão de alimentação de 5 V, a qual é compatível com o módulo de aquisição de dados desenvolvido.



Figura 4.27 – Sensor de caudal YF-S201, adaptado de (PTRobotics, 2024)

4.4.2. Desenvolvimento de *firmware*

Concluída a fase de seleção e desenvolvimento de *hardware*, seguiu-se a fase de desenvolvimento de *firmware*. O *firmware* é responsável pelo controlo dos processos de leitura, armazenamento e exibição de dados ao longo dos ensaios experimentais. A sequencia lógica do mesmo encontra-se representada sob a forma de fluxograma na Figura 4.28.

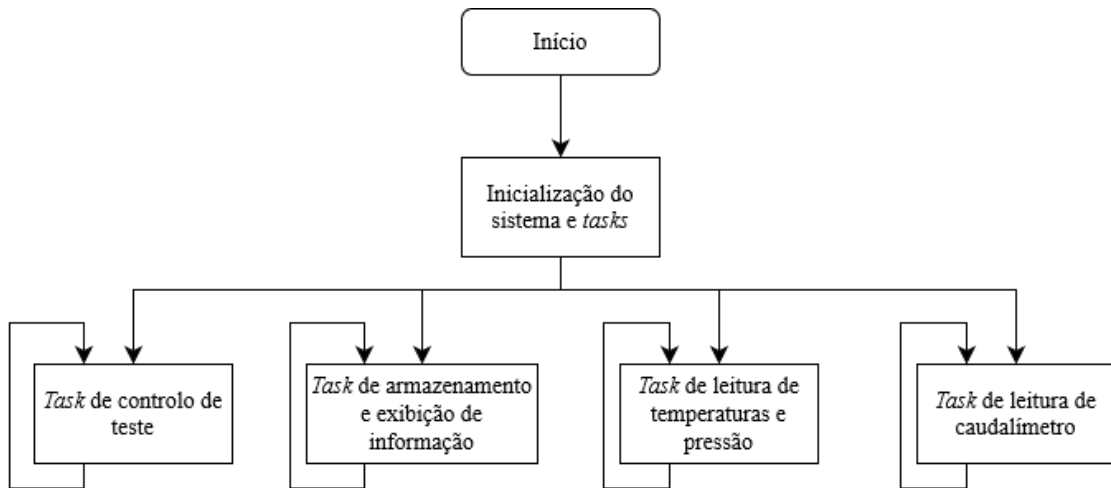


Figura 4.28 – Fluxograma geral do *firmware* desenvolvido

O *firmware* foi desenvolvido no sistema operativo *FreeRTOS*, o qual permite a implementação de tarefas com frequências exatas, bem como a utilização das capacidades computacionais totais do microcontrolador selecionado.

A primeira tarefa implementada baseou-se na leitura do sinal do botão de controlo do estado do teste, tal como se pode observar na Figura 4.29. A razão pela qual esta tarefa foi separada do restante código prendeu-se com o facto de que foi necessário que esta fosse executada a uma frequência mais elevada.

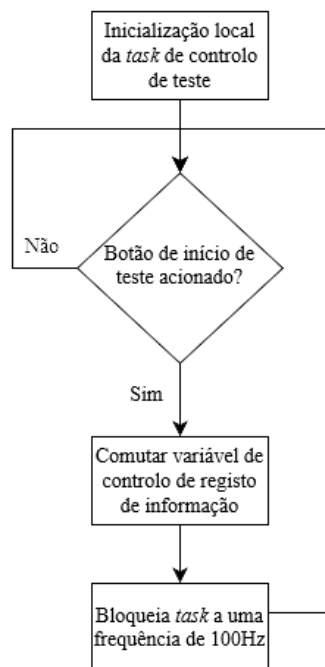


Figura 4.29 – Fluxograma da tarefa de controlo de teste

A tarefa seguinte teve como objetivo o armazenamento e exibição da informação lida nos sensores, quer para calibração das condições da montagem experimental em condições pré-ensaio, quer durante o ensaio propriamente dito. Tal como se pode observar na Figura 4.30, a tarefa de armazenamento e exibição de informação lida nos sensores começa por verificar se a variável de controlo de registo de informação se encontra ativa. Caso isto se verifique, a tarefa irá criar um ficheiro no armazenamento, caso necessário, irá guardar uma nova linha de informação e irá exibir essa mesma linha na porta série do microcontrolador. Caso a variável de controlo de registo de informação não se encontre asserrida, a tarefa irá fechar o ficheiro caso este se encontre aberto e irá continuar a escrever na porta série os valores lidos nos sensores. Após executar todas as instruções necessárias a tarefa é bloqueada durante 500 ms.

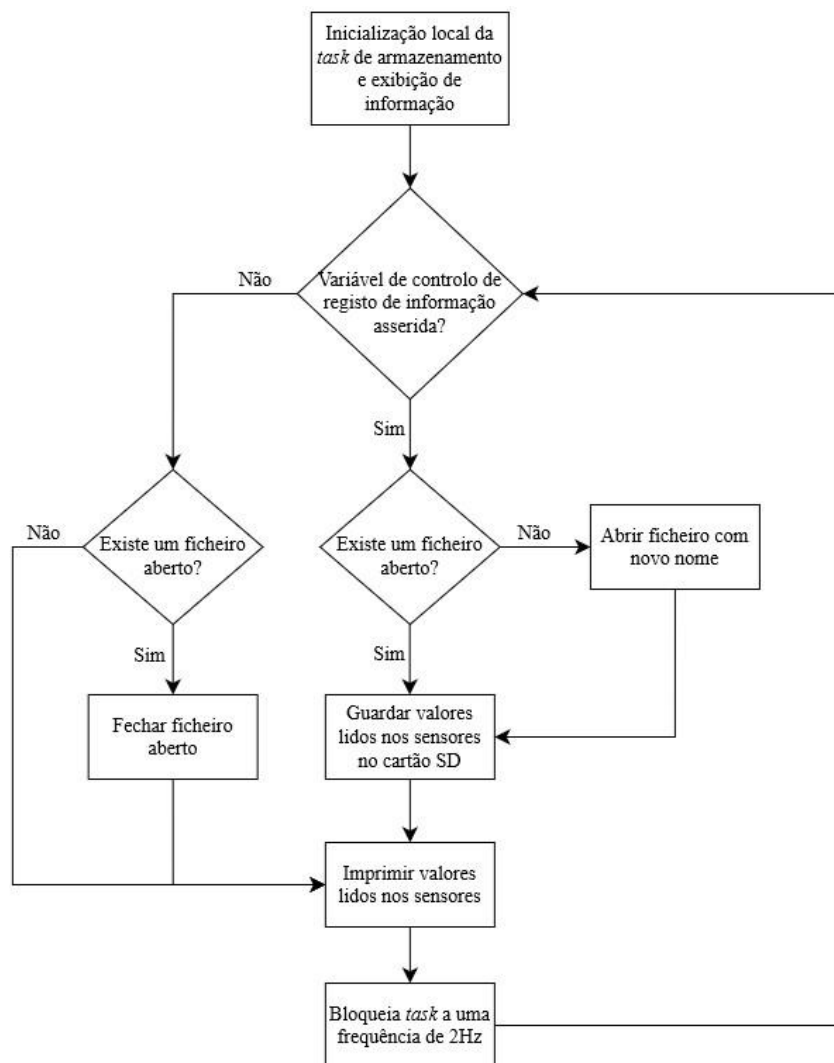


Figura 4.30 – Fluxograma da tarefa de armazenamento e exibição de informação

A tarefa de leitura dos sensores de temperatura e sensor diferencial de pressão realiza a leitura e conversão dos sinais dos sensores referidos. Esta tarefa não esta dependente da variável de controlo de registo de informação, realizando a referida leitura e conversão a uma frequência fixa de 10 Hz, tal como se pode observar no fluxograma da Figura 4.31.

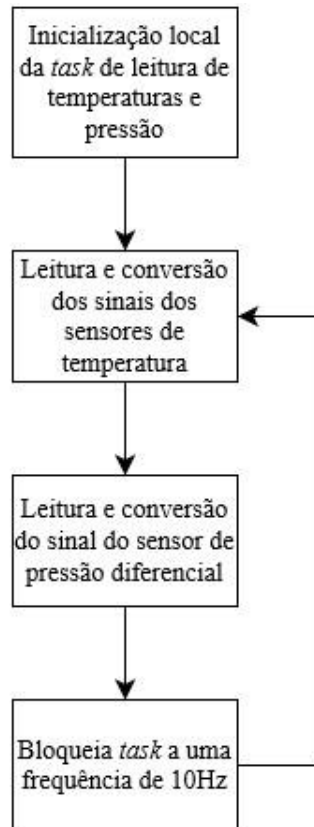


Figura 4.31 – Fluxograma da tarefa de leitura de temperaturas e pressão

Por fim foi implementada a tarefa de leitura do sensor de caudal, a qual é executada a uma frequência de 200 Hz, independente da variável de controlo de registo de informação. Esta tarefa é executada à frequência de 200 Hz uma vez que a frequência máxima que o sinal do sensor pode exibir é de 90 Hz. O fluxograma da tarefa encontra-se representado na Figura 4.32.

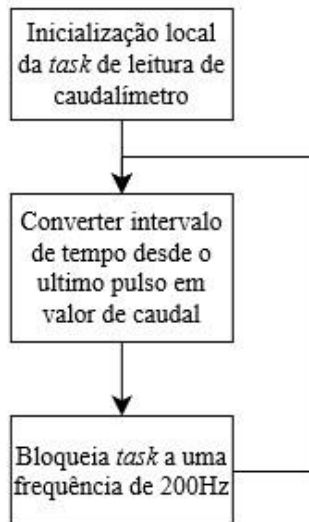


Figura 4.32 – Fluxograma da tarefa de leitura de temperaturas e pressão

Para que os valores de temperatura, caudal e pressão fossem medidos e descodificados de forma correta pelo circuito desenhado, foi necessário proceder à calibração da leitura dos sensores a medir. Este processo de calibração foi, em particular, necessário para os sensores de temperatura, visto que estes apresentaram uma gama de tensões de saída baixa para o intervalo de temperaturas que foi necessário medir.

O processo de calibração para os sensores de temperatura passou, numa primeira instância, por determinar a gama de temperaturas que seria esperado medir durante o ensaio. Foi definido o intervalo de 20 °C a 50 °C para a referida gama de temperaturas. De seguida variou-se a temperatura do fluido de refrigeração ao longo do intervalo de temperatura referido, enquanto este foi circulado pelo circuito recorrendo ao banho térmico da montagem experimental. Simultaneamente, foram registados os valores de tensão medidos pelo microcontrolador e os valores de tensão medidos por um segundo equipamento de medição. Este processo possibilitou o cálculo das diferenças entre os valores de tensão lidos pelo microcontrolador e o equipamento de medição. As referidas diferenças foram usadas numa função de correção de valores de tensão, tendo assim sido possível obter diferenças na ordem de grandeza das unidades de milivolt entre os valores medidos pelo microcontrolador e o equipamento de medição.

4.5. Montagem experimental

De acordo com os dados apresentados nas secções anteriores, nomeadamente de desenvolvimento do invólucro e de seleção dos sensores, procedeu-se à construção da montagem experimental que se ilustra na Figura 4.33 e através da qual foram realizados e obtidos os dados experimentais apresentados na subsecção 5.2.

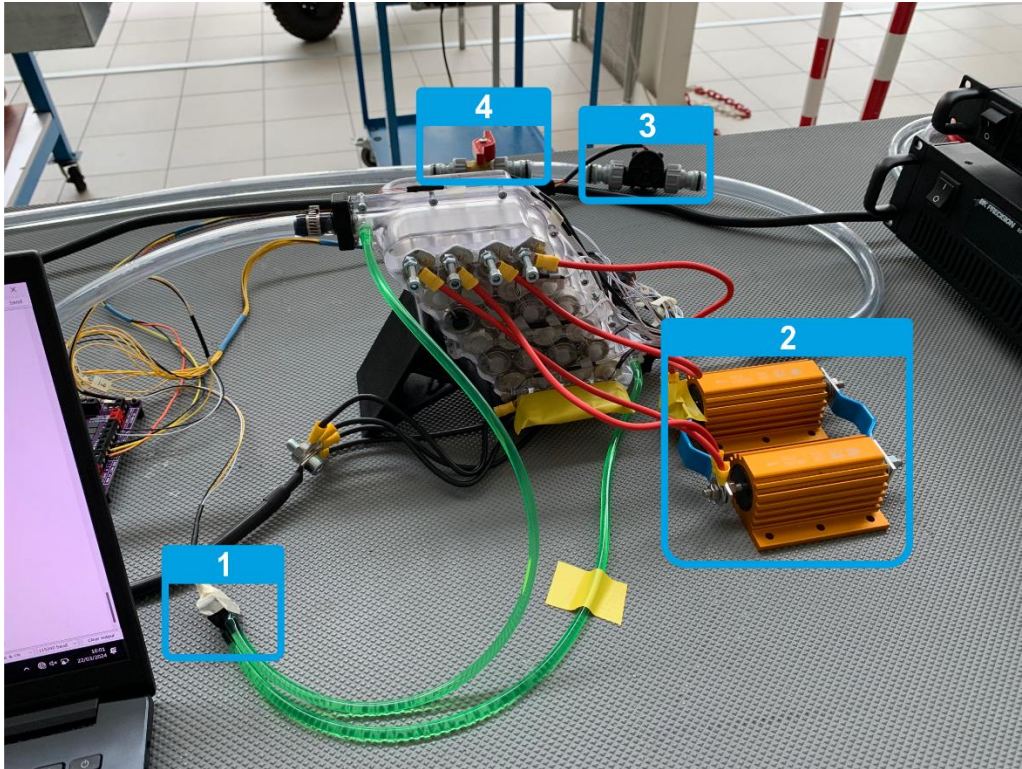


Figura 4.33 – Montagem experimental desenvolvida

A presente secção contém duas subsecções distintas. A subsecção 4.5.1 descreve a vertente física da montagem experimental, incluindo as características físicas da montagem e as características dos equipamentos usados durante o ensaio experimental. A subsecção 4.5.2 contém a metodologia de realização do ensaio experimental, descrevendo as condições de início e fim do ensaio experimental, bem como os processos desenvolvidos para a correta recolha de dados da montagem experimental.

4.5.1. Características físicas

Em paralelo com a realização dos estudos CFD finais, foi realizada a produção do protótipo de validação experimental (Figura 4.34). Foi sobre este protótipo que foram recolhidos todos os resultados experimentais expostos em 5.2.



Figura 4.34 – Protótipo de validação do modelo numérico

O processo de construção do protótipo do invólucro desenvolvido envolveu o uso de diversos processos de produção, nomeadamente, processos como a impressão 3D, colagem de células e invólucro e soldadura de *wirebond* entre células e entre células e *busbars*.

O processo de impressão 3D usado teve como base a tecnologia DLP (*Digital Light Processing*). Este tipo de impressão 3D possui todas as vantagens dos restantes processos de impressão 3D, tendo ainda a capacidade de produzir peças com um acabamento superficial de maior qualidade, o que promove igualmente a qualidade de outras operações como a colagem.

A colagem de células e do invólucro envolveu o uso de resina *epoxy* de dois componentes e de ação rápida. Este tipo de *epoxy* já havia sido usada pela empresa parceira na construção de protótipos anteriores, tendo sido observados bons resultados ao nível de integridade estrutural. Para além da resina *epoxy* foram ainda implementadas ligações aparafusadas ao

longo das superfícies de colagem, de forma a garantir que o processo de colagem seria realizado de forma correta e uniforme.

Conforme referido na secção 4.2.3, a ligação entre células e *busbars* e entre células e células foi conseguida recorrendo ao processo de *wirebonding*. Este processo não gera calor, o que é benéfico para a célula, e resulta numa soldadura limpa e sem necessidade de quaisquer pós tratamento.

Na sua generalidade, o processo de construção do protótipo permitiu que a empresa parceira tivesse a oportunidade de validar/rejeitar múltiplos conceitos e processos de produção para a versão de produção do seu módulo.

Incluídos no grupo do protótipo do invólucro, estiveram incluídos o sensor de pressão diferencial MPX5010DP (1 na Figura 4.33) e os sensores de temperatura NTCLE305E4103SBA.

O equipamento usado para solicitar carga elétrica constante à montagem das células foi o BK Precision 8514B, representado na Figura 4.35. Trata-se de uma carga eletrónica DC de alta precisão com capacidade de dissipar 1500 W e suporta até 120 V e 240 A. (B&K Precision, 2024)



Figura 4.35 – Carga eletrónica DC BK Precision 8514B, adaptado de (B&K Precision, 2024)

No início do ensaio experimental, a montagem de células apresentou um valor de tensão de 24,6 V. Tendo em consideração que durante o teste seria solicitada um valor de corrente de 67,2 A isto resultaria, de acordo com a equação (2.4), na necessidade de dissipar 1653 W. Este valor de potência a dissipar superava o valor máximo estabelecido pelo fabricante da carga eletrónica. Assim, foi necessário realizar a ligação de uma resistência de dissipação de potência entre o polo positivo da montagem de células e a carga eletrónica. Tendo em conta a energia a dissipar, bem como o valor de corrente que a montagem de células iria fornecer, foi calculado que seria necessária uma resistência de potência com valor mínimo de 34 m Ω . Na montagem experimental foram ligadas em paralelo duas resistências de potência (2 na

Figura 4.33) com valor de $100\text{ m}\Omega$, resultando uma resistência equivalente de $50\text{ m}\Omega$, a qual dissipou um pico de 226 W de energia, tendo sido possível desta forma realizar o ensaio experimental usando o *C-Rate* requerido.

Para que fosse possível controlar a temperatura do fluido na entrada do protótipo do invólucro, utilizou-se um equipamento denominado de banho térmico PolyScience 9102 (Figura 4.36), com reservatório de seis litros e com capacidade de manter o fluido no seu interior entre uma gama de temperaturas que se estendem dos $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ aos $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Possui ainda uma bomba interna, a qual foi usada para realizar a circulação do fluido pelo circuito da montagem experimental. (Cole-Parmer, 2024)



Figura 4.36 – Banho térmico PolyScience 9102, adaptado de (Cole-Parmer, 2024)

De forma a controlar a quantidade de caudal na montagem foi adicionada uma válvula manual (4 da Figura 4.33) na linha de fluido, garantindo assim a possibilidade de ajustar o valor de caudal de acordo com as necessidades, o qual foi monitorizado pelo sensor YF-S201 (3 da Figura 4.33).

Em termos de equipamento auxiliar, recorreu-se ainda a um multímetro para realizar o controlo da tensão instantânea da montagem de células, assim como uma pinça amperimétrica como equipamento de redundância na medição do fluxo de corrente no sistema.

4.5.2. Metodologia de recolha de dados

Para que a recolha de dados na montagem experimental descrita na subsecção anterior fosse realizada da forma mais correta possível, foi desenvolvida uma metodologia de execução do ensaio experimental. Esta metodologia consistiu, não só na elaboração dos passos a executar para que o ensaio fosse realizado de forma exata e segura, com também na determinação das condições de início e fim de ensaio. As condições de início e fim de ensaio encontram-se expostas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Condições de início e fim do ensaio experimental

Condições de início de ensaio experimental	
Temperatura de fluido na entrada	25 °C
Temperatura das células	O mais próximo possível de 25 °C
Caudal de fluido	0,0266 kg/s (1,76 l/min)
Tensão da montagem de células	24,6 V
Corrente de descarga programada na carga	67,2 A
Condições de fim de ensaio experimental	
Temperatura das células	Acima de 60 °C
Temperatura da cablagem	Temperatura acima do recomendado
Tempo total de descarga	760 s
Tensão da montagem de células	Menor que 16,2 V

As condições de início do ensaio experimental procuraram replicar as condições impostas no modelo CFD do caso de estudo, o que significa que todas elas tiveram de se verificar antes do início do ensaio.

Por sua vez, as condições de fim de ensaio procuraram garantir a correta realização do mesmo, assim como a segurança pessoal e de todo o equipamento em uso. O limite de temperatura nas células de 60 °C e a temperatura limite da cablagem foram impostas de forma a garantir a segurança do ensaio. O tempo total de descarga das células imposto foi calculado tendo em consideração a capacidade a descarregar e a corrente de descarga, recorrendo à equação (2.2). Por sua vez o valor mínimo de tensão instantânea da montagem de células foi determinado determinando a partir do valor de tensão mínimo por célula de 2,7 V, o que representa uma margem de segurança de 0,2 V para o valor de tensão mínimo indicado pelo fabricante (Molicel, 2023). Para que o ensaio fosse dado como terminado foi apenas necessário que uma das condições apontadas anteriormente se verificasse.

A elaboração da metodologia do ensaio experimental incluiu também a determinação dos passos a realizar antes e durante o ensaio propriamente dito. A lista dos doze passos realizados durante o ensaio experimental consistiu em:

- **1º passo:** Realizar verificações pré-ensaio. O primeiro passo passou pela realização de múltiplas verificações. Estas verificações incluíram: verificar o correto valor de tensão em cada uma das células da montagem, verificar a operação de todos os sensores do sistema, verificar a correta recolha de dados por parte do sistema eletrónico de aquisição de dados e confirmar a presença de todos os equipamentos necessários e confirmar a presença de todo o restante material auxiliar necessário (resistências de dissipação de potência, pinça amperimétrica, multímetro). Após a conclusão deste passo o sistema eletrónico de aquisição de dados foi mantido ligado aos sensores da montagem experimental.
- **2º passo:** Realizar as ligações do circuito de fluido. Após terem sido realizadas todas as verificações apontadas no **1º passo**, o passo seguinte passou por realizar as ligações necessárias para completar o circuito de fluido. Após todas as ligações do circuito de fluido terem sido realizadas, foram colocados quatro litros do fluido dielétrico MIVOLT DF7 no reservatório do banho térmico.
- **3º passo:** Realizar a circulação de fluido pelo circuito de forma a testar o mesmo. Este passo teve três objetivos. Primeiro, confirmar a reserva de fluido no reservatório do banho térmico seria o suficiente para que o ponto de tomada de fluido da bomba do banho térmico se encontrasse permanentemente submerso. Segundo, possibilitar a purga das linhas de tubagem que alimentaram o sensor diferencial de pressão. Terceiro, confirmar que não existiriam fugas de fluido ao longo do circuito.
- **4º passo:** Realizar as ligações entre a montagem de células e a carga eletrónica. Neste passo foi tomado especial cuidado de forma que não ocorresse curto-circuito entre as ligações do sistema. Devido às características geométricas do invólucro da montagem de células o processo de realização das ligações iniciou-se pelo polo negativo da montagem, seguido pelo polo positivo. Antes de fechar o circuito com a carga eletrónica procedeu-se ainda à ligação em série entre as resistências de potência e a carga eletrónica.
- **5º passo:** Realizar ligações dos equipamentos auxiliares de medição. Após terem sido completadas as ligações entre a montagem de células e a carga eletrónica, procedeu-se à ligação dos equipamentos auxiliares de medição. Mais concretamente,

foi ligado um multímetro em paralelo à montagem de células e uma pinça amperimétrica em torno da ligação positiva entre a montagem de células e a carga eletrónica.

- **6º passo:** Configurar parâmetros da carga eletrónica. Este passo consistiu em configurar a corrente de carga constante que a carga eletrónica requereu da montagem de células durante todo o ensaio experimental.
- **7º passo:** Configurar a temperatura alvo no banho térmico e circular fluido. Este passo teve como objetivo configurar as condições alvo do banho térmico, bem como obter o equilíbrio de temperaturas entre as células monitorizadas e fluido, antecipando o início do ensaio experimental. Durante este passo a válvula de controlo de caudal da montagem foi ajustada de forma que o valor lido pelo sensor de caudal fosse o mais próximo possível de 1,74 l/min, tal como indicado na subsecção 4.1.
- **8º passo:** Verificação de redundância da tensão da montagem de células, recolha de dados e parâmetros de configuração da carga eletrónica e banho térmico. Este passo redundante serviu para garantir que os aspetos referidos ainda se encontram de acordo com o esperado, não tendo sido afetados durante os passos anteriormente referidos.
- **9º passo:** Realizar início de recolha de dados. De forma que não existisse perda de dados, procedeu-se ao início da recolha dos mesmos antes de acionar a carga eletrónica.
- **10º passo:** Anotar o tempo atual no registo de dados no momento do acionamento da carga eletrónica. Este momento ditou o início do ensaio experimental propriamente dito. A anotação do tempo atual no momento de atuação da carga eletrónica foi essencial para o tratamento dos resultados experimentais apresentados na subsecção 5.2.
- **11º passo:** Controlo de tempo de ensaio, tensão instantânea da montagem de células e temperaturas de células e cablagem. Todos os aspetos mencionados foram controlados ao longo do ensaio experimental. O tempo de ensaio decorrido foi controlado de forma que não fossem excedidos 760 s. A tensão instantânea da montagem de células foi controlada de forma que esta não apresentasse valores inferiores a 16,2 V. Por fim, as temperaturas das células e da cablagem foram controladas de forma a garantir que nenhuma destas apresentasse valores que comprometessem a segurança do ensaio experimental.

- **12º passo:** Terminar ensaio experimental. Não tendo sido observadas condições adversas durante o ensaio, o mesmo poderia ter sido terminado devido ao valor de tempo decorrido ou devido ao valor de tensão instantânea da montagem de células. O ensaio realizado no contexto do trabalho foi terminado devido ao valor de tensão instantânea da montagem de células. Uma vez que o valor de tensão atingiu os 16,2 V, o ensaio foi dado como concluído e a carga eletrónica desativada.

5. Apresentação e análise resultados

A presente subsecção inclui a apresentação e análise de resultados obtidos referentes ao caso de estudo do presente trabalho. A presente subsecção de apresentação e análise de resultados encontra-se dividida em duas subsecções: a subsecção 5.1, onde se encontram expostos e analisados os resultados do estudo de dependência de malha para o caso de estudo, e a subsecção 5.2, que contém a comparação e análise entre os resultados obtidos a partir do modelo CFD do caso de estudo e os resultados obtidos a partir da montagem experimental.

5.1. Estudo de dependência de malha

Tal como havia sido referido em 4.3.1, o estudo de dependência de malha para o caso de estudo foi realizado com base em modelos CFD que consideraram apenas o volume de fluido e possuíram as configurações apontadas na Tabela 4.7.

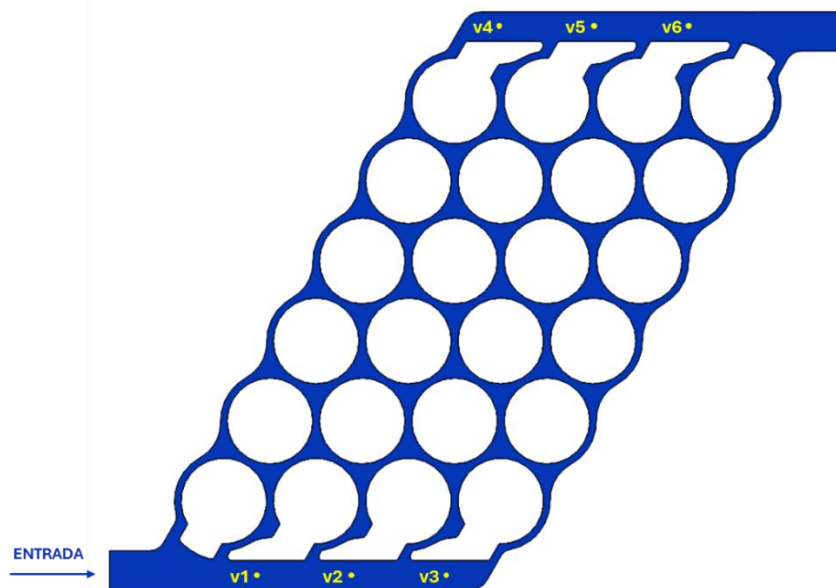


Figura 5.1 – Pontos de medição de velocidade colocados sobre o plano de simetria do volume de fluido

Durante o estudo de dependência de malha foram recolhidos os valores de velocidade do escoamento nos pontos identificados na Figura 5.1 para cada uma das malhas geradas. Foi sobre a diferença entre os valores de velocidade entre iterações de malha com número

crecente de elementos sucessivas, que foi realizado o estudo de dependência de malha, cujos resultados podem ser observados no gráfico da Figura 5.2.

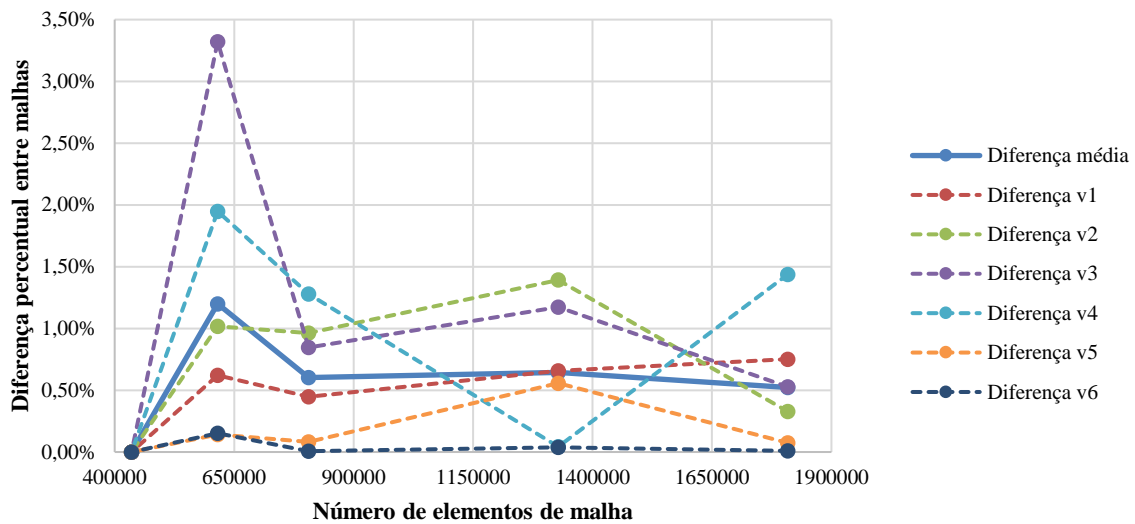


Figura 5.2 – Resultados do estudo de dependência de malha para o caso de estudo, com caudal de entrada de 0,0844 kg/s

A partir dos dados do gráfico da Figura 5.2 foi possível concluir que a malha a partir da qual os resultados deixam de depender do seu número de elementos foi a malha com 1,35 milhões de elementos, uma vez que foi apenas nesta malha que foi observada uma diferença inferior a 2% relativamente às malhas posteriores. Assim sendo, na malha gerada para o modelo CFD final do caso de estudo, foram usados os valores de limite de tamanho de malha de superfície e malha de volume da malha seleccionada após o estudo de dependência de malha do caso de estudo.

5.2. Análise de resultados

Do modelo CFD final realizado para o caso de estudo, foram recolhidos os valores da temperatura relativos às células e ao fluido de refrigeração. A análise de dados que se segue foi realizada sobre os valores de temperatura mais elevados e mais baixos medidos em todas as células. Tal como se pode observar no gráfico da Figura 5.3, para uma taxa de descarga de 4C, foram obtidos picos de temperaturas máximas de 29,6 °C e 27,4 °C para a célula mais quente e para a célula mais fria, respetivamente.

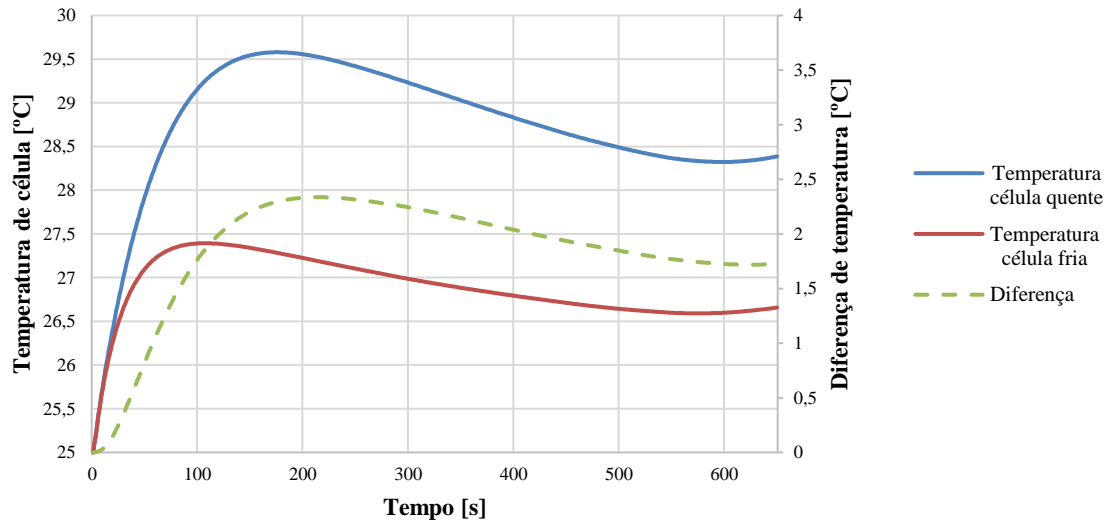


Figura 5.3 – Valores de temperatura das células obtidos a partir do modelo numérico com células em descarga a 4C e caudal de entrada de 0,0266 kg/s

A diferença máxima de temperaturas entre células, durante a descarga a 4C no modelo CFD, atingiu um valor máximo de 2,3 °C. Tendo apenas em perspetiva os dados obtidos a partir do modelo numérico, foi possível confirmar que a distribuição de temperaturas das células é aceitável para uma taxa de descarga de 4C, visto que a diferença entre picos de temperatura máxima e mínima apresenta valores baixos e em nenhuma fase do processo de descarga existiu uma célula que apresentasse um valor de temperatura próximo de 60 °C, limite estabelecido nas condições de fim de ensaio em 4.5.2.

Os contornos de temperatura da Figura 5.4 permitiram concluir que as células que apresentam temperaturas mais elevadas no momento de maior diferença de temperaturas encontram-se no paralelo mais próximo da entrada e no paralelo mais próximo da saída. Isto deve-se à inclinação que o módulo apresenta e à presença de apoios de célula curtos. Estes dois fatores indicam a presença de um fluxo de fluido no interior do invólucro que aparenta ter tendência de ascender na vertical.

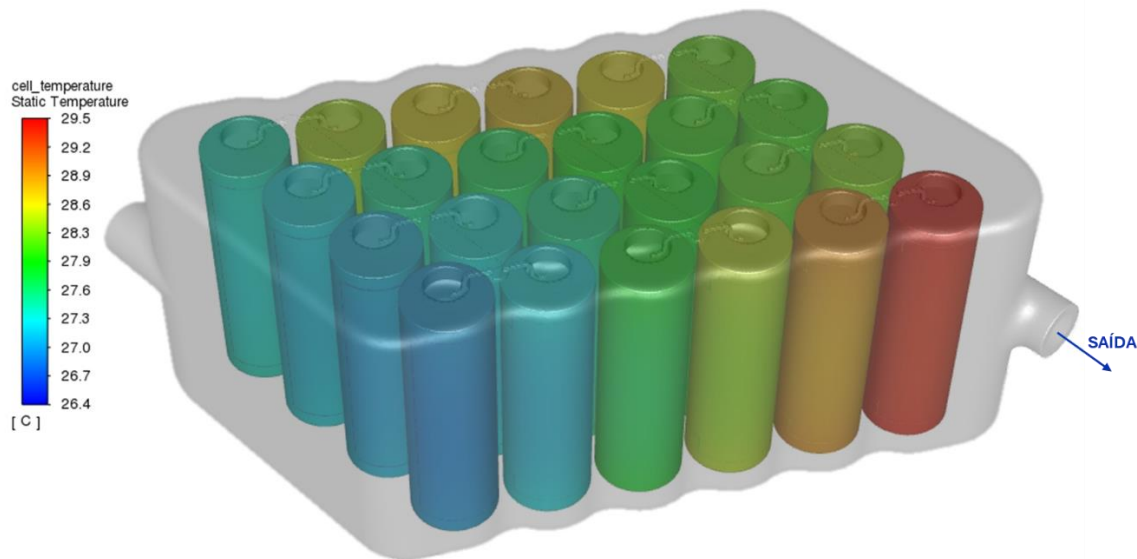


Figura 5.4 – Representação gráfica das temperaturas no instante em que se observou maior heterogeneidade com as células em descarga a 4C e caudal de entrada de 0,0266 kg/s

A informação da Figura 5.4 contém os contornos de temperatura na superfície das células no instante de maior heterogeneidade de temperaturas entre células. Foi com base nesta distribuição de temperaturas que os sensores de temperatura NTC foram aplicados no invólucro.

Tendo sido obtidos resultados numéricos que indicavam que a geometria desenvolvida teria boa capacidade de gestão térmica para o cenário em análise, procedeu-se de seguida à realização do ensaio experimental. Após a conclusão do mesmo, foram comparados numa primeira instância os valores de perda de carga no interior do invólucro segundo o modelo CFD e a montagem experimental. O modelo CFD revelou que a perda de carga no interior do invólucro foi de 421 Pa. Por sua vez os resultados recolhidos na montagem experimental revelaram uma perda de carga de 413 Pa, em média. Isto significa que foi observada uma diferença de 1,9% entre os resultados numéricos e experimentais de perda de carga no interior do invólucro, o que indicou uma boa correlação entre o modelo CFD e a montagem experimental em termos do cálculo do escoamento no interior do mesmo. A referida diferença de 1,9% entre os resultados numéricos e experimentais podem ser atribuídos a erros na aquisição e tratamento do sinal do sensor, assim como a ligeiras flutuações no valor de caudal de fluido observado durante a realização do ensaio experimental.

De seguida foram tratados os dados de temperatura recolhidos na montagem experimental, tendo sido obtido o gráfico da Figura 5.5. No instante em que se verificou o pico de temperaturas nas células, os valores de temperatura na célula mais quente e célula mais fria

atingiram 46,2 °C e 43 °C, respetivamente. Os valores de temperatura referidos representam uma diferença de 3,2 °C entre as temperaturas da célula mais quente e célula mais fria.

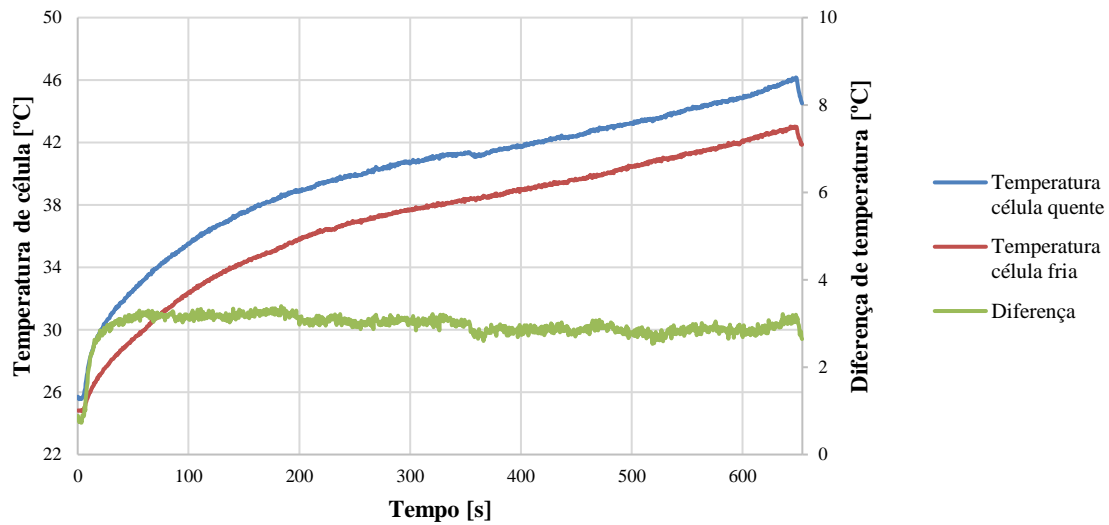


Figura 5.5 – Valores de temperatura das células obtidos a partir da montagem experimental com células em descarga a 4C e caudal de entrada de 0,0266 kg/s

A diferença de temperaturas máxima de 3,2 °C encontrada durante o ensaio experimental é muito semelhante à diferença de temperaturas observada no modelo CFD, no qual se registou uma diferença máxima de temperaturas de 2,3 °C. Também é possível observar que o invólucro desenvolvido aparenta ter a capacidade de manter a homogeneidade de temperaturas durante todo o intervalo de descarga, uma vez que o valor de diferença se mantém sempre muito próximo de 3,2 °C.

No entanto, ao observar a comparação de temperaturas do gráfico da Figura 5.6, pôde concluir-se que os valores de temperatura na célula mais quente medidos na montagem experimental foram demasiado distintos aos calculados através do modelo CFD. No ponto mais díspar, a diferença entre as temperaturas obtidas a partir do ensaio experimental e o modelo CFD atinge os 17,8 °C. Observando esta disparidade de valores, não é possível afirmar que o modelo representa de forma correta a quantidade de calor gerado pela célula durante a descarga a 4C, devendo a reconfiguração do mesmo ser equacionada em trabalhos futuros.

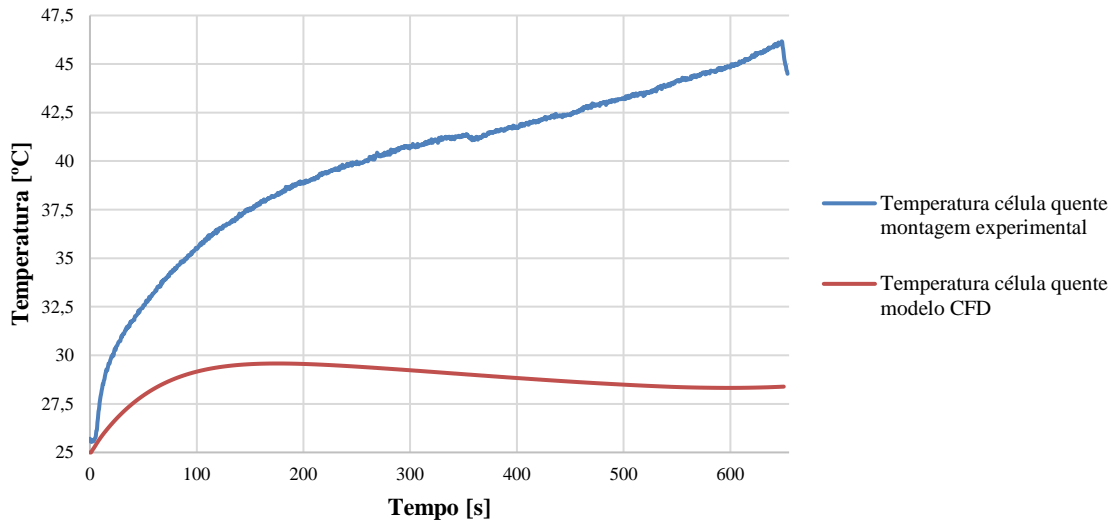


Figura 5.6 – Gráfico comparativo entre temperaturas da célula quente na montagem experimental e modelo CFD

Também foi possível observar uma disparidade elevada entre as temperaturas da célula mais fria obtidas a partir do ensaio experimental e o modelo CFD, tal como se encontra exposto no gráfico da Figura 5.7. Neste caso, o pico de diferença entre as temperaturas referidas atingiu os 16,6 °C. Mais uma vez, isto indica a necessidade de refinar o modelo que já havia sido desenvolvido em (P. B. Silva, 2023). O refinamento do modelo de célula desenvolvido é uma das principais propostas de trabalhos futuros.

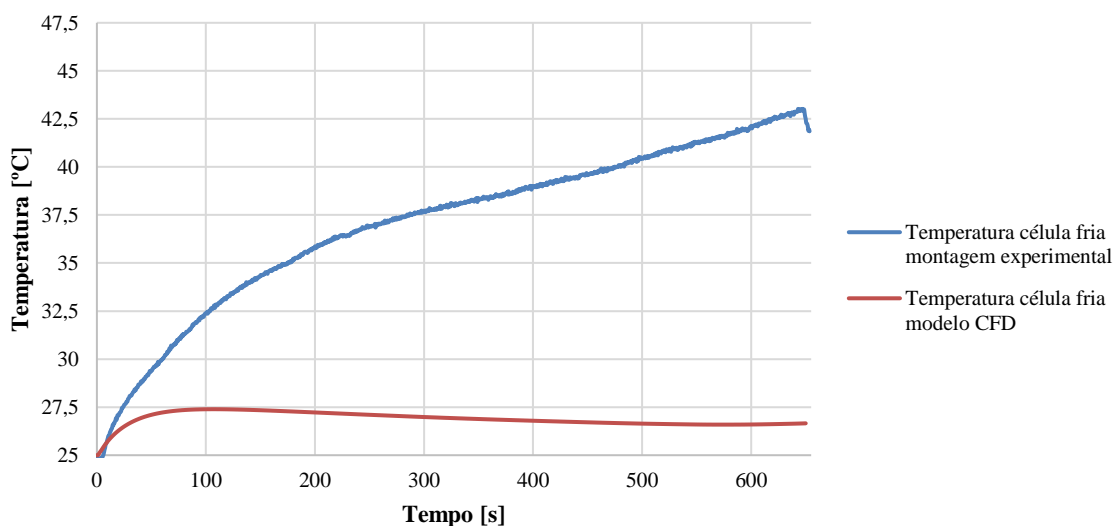


Figura 5.7 – Gráfico comparativo entre temperaturas da célula fria na montagem experimental e modelo CFD

Não obstante, considerando apenas os dados recolhidos durante o ensaio experimental, foi possível afirmar que o invólucro desenvolvido tem uma boa capacidade de manter

homogeneidade de temperaturas das células no interior do mesmo nas condições avaliadas. Apesar de ter sido usado um caudal de fluido baixo (1,74 l/min), a diferença máxima de temperaturas entre as células no interior do invólucro pode ser considerada aceitável, mantendo-se próxima de 3,2 °C ao longo de todo o ensaio. Para além disso nenhuma das células monitorizadas na montagem experimental atingiu o valor limite de temperatura de 60 °C, determinado em 4.5.2.

No entanto, isto não significa que não exista potencial de refinamento do invólucro desenvolvido. Segundo os dados de temperatura de saída do fluido (Figura 5.8), a temperatura máxima atingida pelo fluido na saída do invólucro atingiu os 27,5 °C, um valor muito inferior à temperatura da célula mais fria. Isto indica que o fluido que atinge a saída do invólucro ainda teria capacidade de receber mais quantidade de calor gerado pelas células, o que iria resultar numa redução da temperatura das mesmas. Um dos outros fatores observados no modelo CFD foi a presença de um escoamento laminar no interior do invólucro.

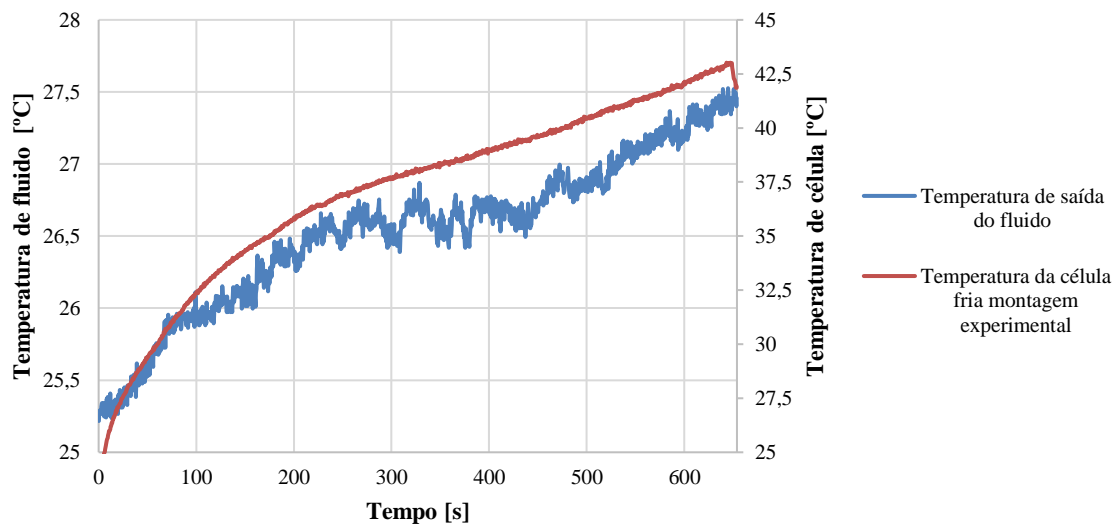


Figura 5.8 – Gráfico comparativo entre temperatura de saída do fluido e temperatura da célula fria na montagem experimental

Na Figura 5.9 é possível observar que o escoamento entre as células apresenta um número de Reynolds inferiores 3500, o que indica um escoamento laminar nessas zonas. Tal como referido na secção 2.1.2.2, a presença de turbulência num escoamento contribui para um coeficiente de transferência de calor por convecção mais elevado, pelo que seria benéfico o aumento da turbulência no escoamento no interior do invólucro.

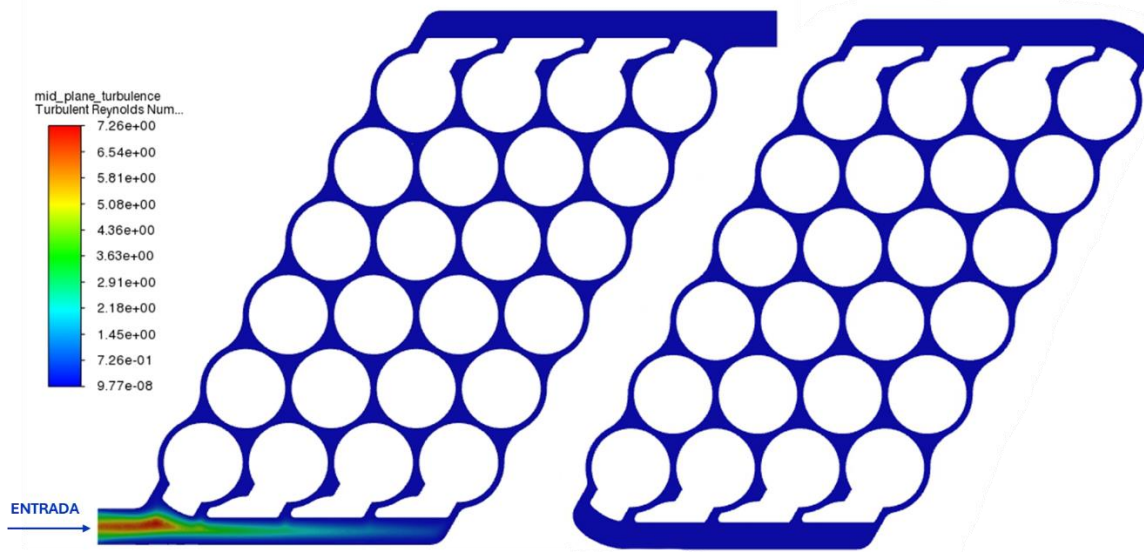


Figura 5.9 – Gráfico de banda de cores para o número de Reynolds do escoamento no plano de simetria (esquerda) e no plano que dista 25mm do plano de simetria e paralelo ao mesmo (direita) com caudal de entrada de 0,0266 kg/s

Assim sendo, uma das propostas de trabalhos futuros passa pelo desenvolvimento de estruturas de geração de turbulência no interior do invólucro. Para isso, uma das estratégias a adotar poderá passar pelo desenvolvimento de estruturas de pequena dimensão nas paredes interiores do invólucro. Estas estruturas teriam o objetivo de originar maior turbulência no escoamento no interior do módulo, tal como as indentações usadas na placa de refrigeração da solução do construtor Lucid, exposta na secção 2.2.2.

Tendo em perspetiva as características físicas da montagem experimental, pode afirmar-se que esta desempenhou a sua função. No entanto, tal como o involucro desenvolvido, a montagem experimental poderá beneficiar de alguns refinamentos. De forma mais concreta, seria vantajoso a introdução de um sistema de gestão de células (BMS) e a introdução de uma bomba com maior capacidade de caudal. O BMS permitiria realizar a carga/descarga da montagem de células de forma mais segura e expedita, permitindo a realização de um maior número de ensaios experimentais num espaço de tempo mais curto. Por sua vez a aplicação de uma bomba com maior capacidade de caudal possibilitaria a realização de testes com maior caudal de fluido, sendo expectável que este caudal mais elevado de fluido fosse necessário para que fosse possível realizar a descarga das células a um *C-Rate* mais elevado. A combinação destes refinamentos iria permitir uma caracterização mais detalhada do involucro desenvolvido.

6. Conclusões e propostas de trabalho futuro

6.1. Principais conclusões

O presente trabalho teve como principais objetivos o desenvolvimento e simulação de um sistema de gestão térmica de células eletroquímicas.

O processo de desenvolvimento envolveu estabelecer as necessidades da empresa parceira para o invólucro de células, as quais ditaram o desenvolvimento do invólucro apresentado no presente relatório. Foram ainda introduzidas e desenvolvidas estruturas no referido invólucro com o objetivo de auxiliar a gestão térmica das células eletroquímicas no seu interior.

O processo de desenvolvimento do invólucro no presente trabalho recorreu a ferramentas de simulação computacional, nomeadamente de CFD, em conjunto com modelos de simulação do comportamento térmico das células de íões de lítio.

De forma a validar o modelo CFD final desenvolvido, o qual modelou o invólucro desenvolvido incluindo a montagem de células eletroquímicas, foi construída uma montagem experimental. A construção da referida montagem requereu o desenvolvimento de um sistema eletrónico de recolha de dados, o qual envolveu processos de desenvolvimento de *hardware* e *firmware* desenvolvidos à medida das necessidades da montagem experimental.

A realização do ensaio experimental permitiu a comparação entre resultados do modelo CFD final e resultados experimentais. Esta comparação revelou que os valores de temperatura nas células obtidos através do modelo numérico apresentam valores muito afastados dos valores obtidos experimentalmente. Ao comparar os resultados experimentais e numéricos foram observadas diferenças de 17,8 °C e 16,6 °C entre os valores de temperatura das células mais quente e mais fria, respetivamente. Esta diferença de valores permitiu concluir que o modelo de célula necessita ainda de maior refinamento para que tenha capacidade de representar o seu comportamento de forma mais real.

Não obstante, os resultados experimentais revelaram que o invólucro desenvolvido teve boa capacidade de homogeneidade de temperaturas das células no seu interior nas condições avaliadas, de resto como igualmente previsto nos modelos numéricos. Após o tratamento

dos resultados experimentais de descarga a 4C, foi obtida uma diferença de temperaturas de 3,2 °C entre a célula mais quente e a célula mais fria da montagem. As temperaturas das células mais quentes rondaram os 45 °C, pelo que em trabalhos futuros seria benéfico avaliar a influência de estruturas de geração de turbulência no escoamento no interior do invólucro no valor de temperatura das células.

A construção do protótipo de invólucro desenvolvido permitiu ainda à empresa parceira validar e evoluir nos conceitos de desenvolvimento e processos de construção para a versão de produção do seu módulo de células.

6.2. Propostas de trabalho futuro

Os aspetos a seguir enumerados poderão ser alvo de desenvolvimento em trabalhos futuros. A saber:

- Refinamento do modelo de célula – o modelo de célula usado carece ainda de maior refinamento, tendo resultado em valores de temperatura de célula no cálculo numérico muito abaixo dos obtidos experimentalmente.
- Estudo da influência de estruturas de geração de turbulência nas paredes interiores do invólucro – apesar de ter sido obtida uma homogeneidade de temperaturas aceitável no interior do protótipo do invólucro, a temperatura de célula máxima foi consideravelmente alta. Como tal, seria benéfico estudar a influencia das estruturas mencionadas na temperatura de célula.
- Implementação de um sistema de BMS (*Battery Management System*) na montagem de células – a introdução de um equipamento BMS na montagem de células permitiria a realização de um maior número de ensaios experimentais num espaço de tempo mais curto.
- Implementação de uma bomba com maior capacidade de caudal na montagem experimental – a implementação de uma bomba com maior capacidade de caudal iria proporcionar uma maior taxa de transferência de calor no interior do involucro, o que permitiria realizar testes a um *C-Rate* mais elevado. Isto resultaria na capacidade de caracterizar o desempenho térmico do invólucro com as células em descarga a correntes mais elevadas.

Bibliografia

- Al-Zareer, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2019). A novel approach for performance improvement of liquid to vapor based battery cooling systems. *Energy Conversion and Management*, 187, 191–204. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.02.063>
- Ansys Inc. (2015). *ANSYS Meshing Lecture 7: Mesh Quality & Advanced Topics*.
- Ansys Inc. (2021). *ANSYS Fluent Theory Guide 2021R1*.
- Automotive Cells Company. (2022, June 30). *Battery Cell, Module or Pack. What's the difference? [Infographics] | Automotive Cells Company*. <https://www.acc-emotion.com/stories/battery-cell-module-or-pack-whats-difference-infographics>
- Battery Design. (2022, December 14). *2022 Tesla Model Y 4680 - Battery Design*. <https://www.batterydesign.net/2022-tesla-model-y-4680/>
- Battery University. (2021, October 25). *BU-302: Series and Parallel Battery Configurations - Battery University*. <https://batteryuniversity.com/article/bu-302-series-and-parallel-battery-configurations>
- Bell, L. (2023, July 7). *GMC's Hummer EV Has a Very Complicated Battery Pack*. Road & Track. <https://www.roadandtrack.com/news/a44475384/gmcs-hummer-ev-has-a-very-complicated-battery-pack/>
- Berkeley Lab. (2023). *Overcharge Protection Prevents Exploding Lithium Ion Batteries - Intellectual Property Office*. <https://ipo.lbl.gov/lbnl3263/>
- Bhowmick, S. (2021, December 16). *Tesla Model S Battery System: An Engineer's Perspective*. <https://circuitdigest.com/article/tesla-model-s-battery-system-an-engineers-perspective>
- B&K Precision. (2024). *B&K Precision - DC Electronic Loads- 8514B*. 2024. https://www.bkprecision.com/products/dc-electronic-loads/8514B?change_language=es
- CFD Flow Engineering. (2023). *Battery Cooling Techniques in Electric Vehicle · CFD Flow Engineering*. <https://cfdflowengineering.com/battery-cooling-techniques-in-electric-vehicle/>
- Choudhari, V. G., Dhoble, D. A. S., & Sathe, T. M. (2020). A review on effect of heat generation and various thermal management systems for lithium ion battery used for electric vehicle. *Journal of Energy Storage*, 32, 101729. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101729>

- Cole-Parmer. (2024). *PolyScience 9102A12E Refrigerated/Heated Circulating Bath*.
<https://www.coleparmer.com/i/polyscience-9102a12e-6-liter-high-stability-digital-controller-refrigerated-heated-circulating-bath-240vac/1211825>
- Concept Group. (2023). *What is a phase change material?*
<https://conceptgroupllc.com/glossary/what-is-a-phase-change-material/>
- Connor Manufacturing. (2024). *Busbars for Electric Vehicles - Connor Manufacturing*.
<https://www.connorms.com/busbars-for-electric-vehicles/>
- DigiKey. (2024a). *MPX5010DP NXP USA Inc. | Sensors, Transducers | DigiKey*.
<https://www.digikey.pt/pt/products/detail/nxp-usa-inc/MPX5010DP/464054>
- DigiKey. (2024b). *NTCLE305E4103SBA Vishay Beyschlag/Draloric/BC Components | Sensors, Transducers | DigiKey*. <https://www.digikey.pt/en/products/detail/vishay-beyschlag-draloric-bc-components/NTCLE305E4103SBA/16530167>
- Dr Bhatt, A., Professor Forsyth, M., Professor Withers, R., & Professor Wang, G. (2023). *How a battery works - Australian Academy of Science*.
<https://www.science.org.au/curious/technology-future/batteries>
- Hermann, W. A. (2012). *Liquid cooling manifold with multi-function thermal interface [TESLA, INC.]* (Patent US8263250B2).
<https://patents.google.com/patent/US8263250B2/en>
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer - 6th edition* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- Kang, K. (2015, March 16). *Gas gauging for lithium-ion batteries - Fully Charged*.
https://e2e.ti.com/blogs_/archives/b/fullycharged/posts/gas-gauging-for-lithium-ion-batteries
- Kannan, C., Vignesh, R., Karthick, C., & Ashok, B. (2021). Critical review towards thermal management systems of lithium-ion batteries in electric vehicle with its electronic control unit and assessment tools. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* (Vol. 235, Issue 7, pp. 1783–1807). SAGE Publications Ltd.
<https://doi.org/10.1177/0954407020982865>
- Kim, J., Oh, J., & Lee, H. (2019). Review on battery thermal management system for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 149, 192–212.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.020>
- Kuipers, M., Jülich, F., Emanuel, F., Mercedes-Benz, H., & Sauer, D. U. (2017). *An in-depth View into the Tesla Model S Module Part Two: Module Characterization and Comparison to Other State of the Art EV Battery Systems*.
<https://www.researchgate.net/publication/315800624>

- Leichsenring, S. (2021, April 14). *Audi Q4 e-tron und Q4 Sportback e-tron vorgestellt*. InsideEVs. <https://insideevs.de/news/500815/audi-q4-etron-sportback-vorstellung/>
- Lucid Motors. (2022, March 10). *Battery Pack | Tech Talks | Lucid Motors*. <https://www.youtube.com/watch?v=2aDyJ5wj64>
- Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., Deng, T., & Shang, W. (2018). *Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review*. <https://doi.org/10.1016/j.jpnc.2018.11.002>
- Martinho, N. (2024). *DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) INTRODUÇÃO E EXEMPLO DE APLICAÇÃO*.
- Menale, C., Constà, S., Sglavo, V., Della Seta, L., & Bubbico, R. (2022). Experimental Investigation of Overdischarge Effects on Commercial Li-Ion Cells. *Energies*, 15(22). <https://doi.org/10.3390/en15228440>
- Molicel. (2023). *Molicel INR-21700-P42A Datasheet*. <https://www.molicel.com/wp-content/uploads/INR21700P42A-V4-80092.pdf>
- MSE Supplies. (2019, October 17). *Source of Detrimental Dendrite Growth in Lithium Batteries Discovered– MSE Supplies LLC*. <https://www.msesupplies.com/blogs/news/source-of-detrimental-dendrite-growth-in-lithium-batteries-discovered>
- Peng, J., Meng, J., Chen, D., Liu, H., Hao, S., Sui, X., & Du, X. (2022). A Review of Lithium-Ion Battery Capacity Estimation Methods for Onboard Battery Management Systems: Recent Progress and Perspectives. *Batteries*, 8(11), 229. <https://doi.org/10.3390/batteries8110229>
- Pires, A., Stockton, W. B., Spooner, C., Prodan, C., Gorasia, J. B., Harris, K., Burke, D., Szafer, D. G., Patel, K., Parker, B., Hegeman, D. E., & Sumpf Jr, R. D. (2020). *Integrated Energy Storage System [TESLA, INC.]* (Patent 17/100700). <https://uspto.report/patent/app/20210159567#D00004>
- PTRobotics. (2024). *Sensor de Controlo de Fluxo de Água YF-S201 | Sensor Hall | PTR007945*. <https://www.ptrobotics.com/sensor-hall/7945-sensor-de-controlo-de-fluxo-de-agua-yf-s201.html>
- Rawlinson, P. D. (2014). *EV battery pack multi-mode cooling system* (Patent US9731621B2). <https://patents.google.com/patent/US9731621B2/en?inventor=Peter+Dore+Rawlinson&assignee=Atieva%2c+Inc>
- Roe, C., Feng, X., White, G., Li, R., Wang, H., Rui, X., Li, C., Zhang, F., Null, V., Parkes, M., Patel, Y., Wang, Y., Wang, H., Ouyang, M., Offer, G., & Wu, B. (2022). Immersion cooling for lithium-ion batteries-A review. *Journal of Power Sources*, 525, 231094. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231094>

- Samsung, S. (2023). *'Electrolyte', the best driver for lithium-ion*.
<https://www.samsungdi.com/column/technology/detail/56542.html?listType=gallery>
- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities 2021, Vol. 4, Pages 372-404*, 4(1), 372–404.
<https://doi.org/10.3390/SMARTCITIES4010022>
- Silva, D., Multiscale Modelling, C., Zaghbi, K., Song, S.-W., Ali, M. A., Da Silva, C. M., & Amon, C. H. (2023). Multiscale Modelling Methodologies of Lithium-Ion Battery Aging: A Review of Most Recent Developments. *Batteries 2023, Vol. 9, Page 434*, 9(9), 434. <https://doi.org/10.3390/BATTERIES9090434>
- Silva, P. B. (2023). *Estudo numérico (CFD) e experimental do comportamento térmico de células de íões de lítio*. Politécnico de Leiria.
- Tecomotive. (2024). *Pierburg CWA150 Datasheet*.
https://www.tecomotive.com/download/datasheets/CWA150_EN.pdf
- Totman, M., Brčić, N., Cesar, F., Rimac, M., & Šarić, A. (2021). *Battery module and method for cooling the battery module* (Patent WO2022069910A1).
<https://patents.google.com/patent/WO2022069910A1/en?q=WO2022069910A1>
- Tsuchiya, T., Yoneda, S., Oomuta, R., Watanabe, T., & Maruta, Y. (2014). *Battery cooling structure* (Patent US9893395B2). <https://patents.google.com/patent/US9893395B2/en>
- Veldboom, B. (2021, November 16). *How Do Battery Charging Cycles Work?*
<https://www.batteriesplus.com/blog/power/battery-discharge-cycle>
- Zhang, X., Li, Z., Luo, L., Fan, Y., & Du, Z. (2022). A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energy*, 238.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.121652>
- Zhao, G., Wang, X., Negnevitsky, M., & Li, C. (2023). An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119626.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119626>