

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA. CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

GABRIEL MURBACH

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CONTROLE TÉRMICO DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO
COM MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE (PCM)**

São João da Boa Vista
2025

Gabriel Murbach

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CONTROLE TÉRMICO DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO
COM MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE (PCM)**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Aeronáutica .

Orientador: Prof. Dr. Edemar Morsch Filho

São João da Boa Vista
2025

M972s	Murbach, Gabriel Simulação numérica do controle térmico de baterias de íon-lítio com material de mudança de fase (PCM). / Gabriel Murbach. -- São João da Boa Vista, 2025 57 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista Orientador: Edemar Morsch Filho 1. Análise térmica. 2. Trocadores de calor. 3. Baterias de lítio. I. Título.
-------	---

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CONTROLE TÉRMICO DE BATERIAS DE ÍON-
LÍTIO COM MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE (PCM)**

Aluno: Gabriel Murbach

Orientador: Prof. Dr. Edemar Morsch Filho

Banca Examinadora:

- Edemar Morsch Filho (Orientador)
- Gabriel Rodrigues Pinto (Examinador)
- Leandra Isabel de Abreu (Examinador)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 29 de outubro de 2025

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer às pessoas que me acolheram e me acompanharam em toda a trajetória da minha vida, especialmente quando entrei na faculdade.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais por sempre se esforçarem ao máximo para que eu pudesse estudar e desenvolver minhas habilidades. Sou grato pelos ensinamentos da vida e por todas as cobranças que, hoje, sei que foram essenciais para o meu desenvolvimento.

Agradeço aos meus colegas de casa, João Noda e Vinicius Breyer, por me acolherem nesta nova jornada, por estudarem comigo, por me ajudarem nos afazeres domésticos e por crescermos juntos, aprendendo mais sobre a vida.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante o curso. Vocês foram essenciais, tornando essa caminhada mais leve. Obrigado pelas festas, churrascos, sorvetes, lanches e tantas outras memórias. Levo todos vocês no coração.

Agradeço ao apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Projeto Regular FAPESP 2026/00620-3) e a Royal Society (Reino Unido), no âmbito do programa de financiamento International Collaboration Awards 2024 (ISPF, referência do projeto: ICAO R1 241065, TERRA).

Por fim, agradeço aos professores e funcionários da UNESP, em especial ao meu professor orientador, Edemar Morsch Filho, por me dar todo o apoio quando requisitado, por me guiar no uso dos softwares e pela orientação na execução do meu trabalho.

“Obsessão ganha do talento“
Arremesando alto(filme)

RESUMO

A crescente demanda por baterias de íon-lítio de alto desempenho, especialmente em veículos elétricos e dispositivos eletrônicos, intensificou a necessidade de métodos eficientes de controle térmico. Este trabalho apresenta uma análise numérica do gerenciamento térmico de uma bateria cilíndrica de íon-lítio 18650 acoplada a um material de mudança de fase (PCM), por meio de simulações utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*- CFD). O estudo é dividido em duas etapas: validação separada dos modelos da bateria e do PCM, e posterior simulação do sistema integrado, avaliando o impacto de diferentes correntes elétricas (6 A, 9 A e 12 A) e orientações da bateria (horizontal e vertical). Os resultados mostram que a integração com PCM é eficaz na contenção da temperatura, promovendo maior estabilidade térmica e favorecendo a segurança e o desempenho da bateria. Além disso, observou-se que a orientação da bateria influencia significativamente o processo de fusão do PCM, sendo a posição horizontal mais favorável para a dissipação térmica. Conclui-se que o uso de PCM é uma estratégia viável e eficiente para o gerenciamento térmico passivo de baterias, contribuindo para seu uso mais seguro e duradouro.

PALAVRAS-CHAVE: transferência de calor; simulação numérica; baterias de íon-lítio; PCM; CFD.

ABSTRACT

The growing demand for high-performance lithium-ion batteries, especially in electric vehicles and electronic devices, has intensified the need for efficient thermal control methods. This work presents a numerical analysis of the thermal management of a cylindrical 18650 lithium-ion battery integrated with a phase change material (PCM), through simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD). The study is divided into two stages: separate validation of the battery and PCM models, and simulation of the integrated system, evaluating the influence of different electric currents (6 A, 9 A, and 12 A) and battery orientations (horizontal and vertical). The results show that integration with PCM is effective in containing temperature, promoting greater thermal stability and enhancing the battery's safety and performance. Furthermore, it was observed that battery orientation significantly influences the PCM melting process, with the horizontal position being more favorable for thermal dissipation. It is concluded that PCM is a viable and efficient strategy for passive thermal management of batteries, contributing to their safer and longer-lasting operation.

KEYWORDS: heat transfer; numerical simulation; lithium-ion batteries; PCM; CFD.

.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Aeronave ES-30: híbrido elétrico	13
Figura 2	Bateria após explosão	14
Figura 3	Desempenho de bateria de íon-lítio sob diferentes temperaturas	14
Figura 4	PCM feito de cera de palma, no estado sólido em flocos	15
Figura 5	Baterias de íon-lítio 18650	16
Figura 6	Bateria de lítio após explosão	17
Figura 7	Resfriamento por microcanais	18
Figura 8	Análise térmica de diferentes métodos de resfriamento	19
Figura 9	Módulo de resfriamento de bateria	20
Figura 10	Estratégia híbrida de resfriamento com PCM, placas frias e ar	20
Figura 11	Efeito do comprimento das aletas estendidas nas temperaturas da célula e do PCM	20
Figura 12	Combinação de refrigeração ativa e passiva	21
Figura 13	Geometria avaliada por Zhang <i>et al.</i> (2017)	22
Figura 14	Modelos avaliados por Zhang <i>et al.</i> (2022)	23
Figura 15	Dimensões e vistas da caixa de PCM	24
Figura 16	Dimensões da bateria	24
Figura 17	Bateria integrada no PCM	25
Figura 18	Malha gerada para as simulações	25
Figura 19	Geometria PCM - placa	29
Figura 20	Posições da fonte térmica para estudo	30
Figura 21	Orientação da bateria: H - horizontal (esquerda); V - Vertical (direita)	31
Figura 22	Validação do modelo de PCM	32
Figura 23	Validação do modelo da bateria	33
Figura 24	Fração líquida para diferentes posições da fonte de calor, no instante de 2000 s	34
Figura 25	Temperaturas média e máxima no PCM, com bateria na horizontal e $I = 6 \text{ A}$	35
Figura 26	Temperatura máxima, média e mínima na bateria horizontal e $I = 6 \text{ A}$	36
Figura 27	Fração líquida no PCM, com bateria na horizontal e $I = 6 \text{ A}$	36
Figura 28	Campo de fração líquida nos planos perpendicular e paralelo da bateria na horizontal, para $I = 6 \text{ A}$ e 1200 s	37
Figura 29	Campo de temperaturas nos planos perpendicular e paralelo da bateria na horizontal, para $I = 6 \text{ A}$ e 1200 s	37
Figura 30	Avanço do campo de fração líquida, com bateria na horizontal e $I = 6 \text{ A}$	38
Figura 31	Temperaturas média e máxima no PCM, com bateria na horizontal e $I = 9 \text{ A}$	38
Figura 32	Temperatura máxima, média e mínima na bateria horizontal e $I = 9 \text{ A}$	39
Figura 33	Fração líquida no PCM, com bateria na horizontal e $I = 9 \text{ A}$	39
Figura 34	Avanço do campo de fração líquida, com bateria na horizontal e $I = 9$	40
Figura 35	Temperaturas média e máxima no PCM, com bateria na horizontal e $I = 12 \text{ A}$	40

Figura 36	Temperatura máxima, média e mínima na bateria horizontal e $I = 12\text{ A}$	41
Figura 37	Fração líquida no PCM, com bateria na horizontal e $I = 12\text{ A}$	41
Figura 38	Avanço do campo de fração líquida, com bateria na horizontal e $I = 12$	42
Figura 39	Temperaturas média e máxima no PCM, com bateria na vertical e $I = 6\text{ A}$	42
Figura 40	Temperatura máxima, média e mínima na bateria vertical e $I = 6\text{ A}$	43
Figura 41	Fração líquida no PCM, com bateria na vertical e $I = 6\text{ A}$	43
Figura 42	Avanço do campo de fração líquida, com bateria na vertical e $I = 6\text{ A}$	44
Figura 43	Temperaturas média e máxima no PCM, com bateria na vertical e $I = 9\text{ A}$	44
Figura 44	Temperatura máxima, média e mínima na bateria vertical e $I = 9\text{ A}$	45
Figura 45	Fração líquida no PCM, com bateria na vertical e $I = 9\text{ A}$	45
Figura 46	Avanço do campo de fração líquida, com bateria na vertical e $I = 9$	46
Figura 47	Temperaturas média e máxima no PCM, com bateria na vertical e $I = 12\text{ A}$	46
Figura 48	Temperatura máxima, média e mínima na bateria vertical e $I = 12\text{ A}$	47
Figura 49	Fração líquida no PCM, com bateria na vertical e $I = 12\text{ A}$	47
Figura 50	Avanço do campo de fração líquida, com bateria na vertical e $I = 12$	48
Figura 51	Fração líquida do PCM para diferentes correntes e posições	48
Figura 52	Temperaturas máximas do PCM obtidas para diferentes posições e correntes . .	49
Figura 53	Temperaturas máximas da bateria obtidas para com e sem o uso de PCM em torno da bateria	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Casos de gerenciamento térmico de baterias de íon-lítio	18
Tabela 2 – Propriedades materiais	29
Tabela 3 – Propriedades materiais para validação do PCM	30
Tabela 4 – Fração líquida do PCM para as 3 diferentes posições de fonte de calor em 2000 s	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica dos Fluidos Computacional)
PCM	<i>Phase Change Material</i> (Material de Mudança de Fase)
TES	<i>Thermal Energy Storage</i> (Armazenamento de Energia Térmica)
LHTES	<i>Latent Heat Thermal Energy Storage</i> (Armazenamento de Energia Térmica por Calor Latente)
CPCM	<i>Composite Phase Change Material</i> (Material de Mudança de Fase Composto)
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
PRESTO	<i>Pressure Staggering Option</i> (Opção de Escalonamento da Pressão)

LISTA DE SÍMBOLOS

A_m	Coeficiente de porosidade [$Kg/(m^3 s)$]
c_p	Calor específico [$J/kg \cdot K$]
D	Comprimento característico [m]
Gr	Número de Grashof [-]
g	Gravidade [m/s^2]
H	Entalpia do material [J]
h	Coeficiente de convecção natural
I	Corrente [A]
k	Coeficiente de transferência de calor por condução [$W/(m \cdot K)$]
L	Calor latente de fusão [J/kg]
Pr	Número de Prandtl [-]
p	Pressão estática [Pa]
Q_c	Capacidade da bateria [Ah]
$\dot{q}$	Taxa de geração interna de energia [W/m^3]
R	Resistência interna equivalente [$m.\Omega$]
Re	Número de Reynolds [-]
SoC	Estado de carga [C]
SoC_{in}	Carga inicial da bateria [C]
T	Temperatura [$^{\circ}C$]
T_l	Temperatura do líquido na iminência da solidificação [$^{\circ}C$]
T_{ref}	Temperatura de referência [$^{\circ}C$]
T_s	Temperatura do sólido na iminência da fusão [$^{\circ}C$]
t	Tempo [s]
U	Vetor Velocidade [m/s]
V_b	Volume da bateria [m^3]

α	Coeficiente de expansão térmica [K^{-1}]
β	Fração líquida [-]
Δt	Variação de tempo [s]
∇	Operador nabla [$1/m$]
δ	Constante de taken [-]
$\partial U_0/\partial T$	Coeficiente térmico de entropia [$m \cdot V$]
μ	Viscosidade dinâmica [$Pa \cdot s$]
ν	Viscosidade cinemática [m^2/s]
ρ	Densidade [kg/m^3]
ρ_{ref}	Densidade de referência [kg/m^3]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Controle térmico de baterias	14
1.2	Objetivo do trabalho	16
1.3	Organização do trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	A bateria de Íon-Lítio e seu controle térmico	17
2.2	O material de mudança de fase - PCM	21
3	METODOLOGIA	24
3.1	Geometria	24
3.1.1	PCM - caixa	24
3.1.2	Bateria	24
3.1.3	Geometria integrada	25
3.2	Malha	25
3.3	Modelagem numérica	25
3.3.1	PCM	26
3.3.2	Bateria	26
3.4	Condições iniciais e condições de contorno	28
3.5	Propriedades dos materiais	28
3.6	Parâmetros da simulação	28
3.7	Validação dos modelos	28
3.8	Estudos de caso	30
4	RESULTADOS	32
4.1	Validação dos resultados	32
4.1.1	PCM	32
4.1.2	Bateria	33
4.2	Posição da fonte de calor	33
4.3	PCM e bateria integrados	34
4.3.1	Bateria na horizontal	35
4.3.1.1	<i>Corrente elétrica de 6 A</i>	35
4.3.1.2	<i>Corrente elétrica de 9 A</i>	38
4.3.1.3	<i>Corrente elétrica de 12 A</i>	40
4.3.2	Bateria na vertical	42
4.3.2.1	<i>Corrente elétrica de 6 A</i>	42
4.3.2.2	<i>Corrente elétrica de 9 A</i>	44
4.3.2.3	<i>Corrente elétrica de 12 A</i>	46

4.3.3	Horizontal <i>versus</i> vertical	48
5	CONCLUSÃO	51
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Desde a criação das baterias eletroquímicas em 1800, por Alessandro Volta (Piccolino (2000)), as baterias eletroquímicas exercem um papel fundamental no desenvolvimento tecnológico da sociedade. Com as mais diversas aplicações, abrangendo desde o armazenamento de energia, o seu uso em aparelhos eletrônicos e até mesmo sistemas de transporte, essas baterias se tornaram indispensáveis para a vida moderna atual. Entre as diferentes baterias eletroquímicas, atualmente as de íon de lítio se destacam. Sua alta eficiência, longa vida útil e elevada densidade energética, as tornou amplamente utilizadas nos setores tecnológicos, industriais e militares, como: dispositivos eletrônicos portáteis, sistema de armazenamento de energia renovável, aplicações militares, aeroespaciais, e automotivas (Chen *et al.* (2021)). Na Figura 1, destaca-se em verde o conjunto de baterias proposto para um novo modelo de aeronave híbrido elétrico.

Figura 1 – Aeronave ES-30: híbrido elétrico



Fonte: Adaptado de Deangelis (2024).

A crescente popularidade das baterias de íon de lítio se deve ao seu desempenho superior em comparação com outras tecnologias de baterias, como as de chumbo-ácido ou níquel-cádmio. Elas oferecem uma relação energia/massa significativamente maior, ciclos de recarga mais eficientes e menor taxa de autodescarga, permitindo melhores usos em condições e cenários diversificados. Porém um fator crítico que pode impactar o desempenho, a segurança e a durabilidade dessas baterias é a temperatura de operação (Cotti (1995)).

A faixa de temperatura ideal para o funcionamento dessas baterias varia entre 25 e 40° C (Xu & He (2013)). Operações fora desse intervalo podem comprometer o desempenho da bateria, resultando em uma redução da vida útil, perda de capacidade, e em cenários mais graves, até mesmo danos catastróficos como fuga térmica, que é um fenômeno em que a temperatura interna da bateria se eleva descontroladamente, levando ao risco de incêndio ou explosão. Esse fenômeno é ainda mais crítico em sistemas com alta densidade de energia, como veículos elétricos e aeronaves, onde o controle

térmico é importante para garantir a segurança e confiabilidade do sistema. Apenas para exemplificar, a Figura 2 mostra o incêndio em bateria, resultado de uma fuga térmica.

Figura 2 – Bateria após explosão



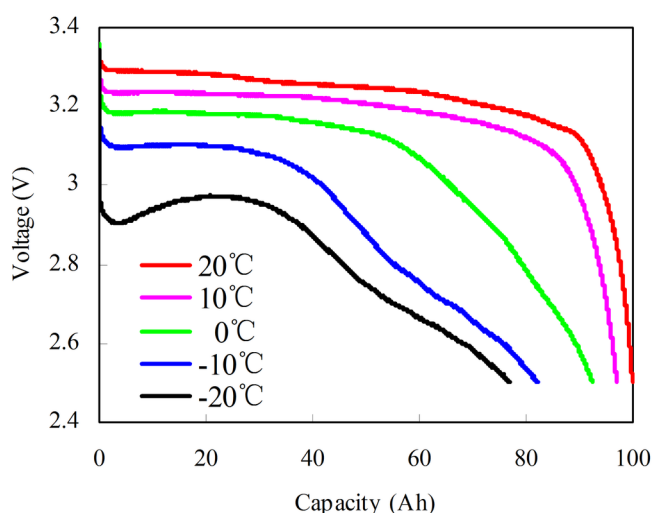
Fonte: Adaptado de Daher (2016.).

1.1 CONTROLE TÉRMICO DE BATERIAS

Durante os ciclos de carga e descarga das baterias de íon de lítio, ocorre uma geração interna de calor, que é um subproduto natural do processo eletroquímico (Zhang *et al.* (2017)). Esse calor, se não dissipado de forma adequada, eleva a temperatura das células além da faixa de operação recomendada, comprometendo tanto a segurança quanto o desempenho do sistema.

A Figura 3 ilustra o desempenho de uma bateria de íon-lítio sob diferentes temperaturas, onde é possível verificar que valores fora da faixa recomendada provocam uma variação mais precoce na tensão da bateria, assim como reduções significativas em sua capacidade de armazenamento. Em geral, os dispositivos eletrônicos exigem uma certa tensão mínima para operarem corretamente, portanto variações nesse parâmetro comprometem o seu desempenho. Além disso, enquanto sob 20°C a capacidade (energia entregue) chegou próxima de 100 Ah, sob -20°C esse valor reduziu para menos de 80 Ah, ou seja, menos energia pode ser armazenada e entregue.

Figura 3 – Desempenho de bateria de íon-lítio sob diferentes temperaturas



Fonte: Feng, Lu & Zhu (2014).

Para lidar com essa problemática, podem ser empregados sistemas de gerenciamento térmico a fim de manter a temperatura das baterias dentro de níveis aceitáveis. Os métodos de resfriamento utilizados para o gerenciamento térmico de baterias podem ser classificados em duas categorias principais: resfriamento ativo e resfriamento passivo. O resfriamento ativo envolve a utilização de dispositivos mecânicos, como ventiladores, bombas ou sistemas de refrigeração, para forçar a circulação de ar ou líquido ao redor das baterias, dissipando o calor gerado. Embora eficaz, o resfriamento ativo requer consumo de energia adicional e pode adicionar complexidade ao sistema, levando a maiores custos para sua aplicação.

Por outro lado, o resfriamento passivo oferece uma alternativa mais simples e eficiente em termos energéticos, utilizando materiais que absorvem e dissipam o calor sem a necessidade de componentes mecânicos ou consumo de eletricidade. Entre as diversas tecnologias de resfriamento passivo, os materiais de mudança de fase (*Phase Change Materials* - PCM) surgem como uma potencial solução para manter a temperatura ideal do sistema.

Os PCMs são materiais capazes de armazenar e liberar grandes quantidades de energia térmica durante sua transição de fase, normalmente entre sólido e líquido. Durante o processo de fusão, quando o material derrete e torna-se líquido, o PCM absorve calor do ambiente por meio do calor latente de fusão, sem que haja uma variação significativa na sua temperatura. Similarmente, quando a temperatura ambiente diminui, o PCM que está na fase líquida é capaz de liberar energia térmica e se solidificar sem uma variação significativa de temperatura durante esse processo. Esta característica os torna extremamente úteis em aplicações de controle térmico, como o resfriamento de baterias, edifícios e dispositivos eletrônicos, pois podem manter a temperatura dentro de uma faixa ideal ao armazenar o calor gerado durante a operação da tecnologia, evitando um aquecimento ou resfriamento excessivamente elevado (Zhang *et al.* (2017)). Para demonstrar, a Figura 4 consiste em uma amostra de PCM, ainda no estado sólido e no formato de flocos.

Figura 4 – PCM feito de cera de palma, no estado sólido em flocos



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Sabendo que as baterias de íon-lítio estão disponíveis em uma ampla variedade de formas geométricas, como prismáticas, cilíndricas e planares, o presente trabalho focará em um dos modelos mais utilizados atualmente: a bateria cilíndrica de íon-lítio 18650, ilustrada na Figura 5. Essa bateria se tornou padrão para várias indústrias, sendo amplamente empregada em dispositivos eletrônicos por-

táteis, veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia, cujo código 18650 é representativo para um diâmetro 18 mm de diâmetro e 65 mm de comprimento.

Figura 5 – Baterias de íon-lítio 18650



Fonte: Adaptado de SMART KITS (Fortaleza, 2024).

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar numericamente o desempenho térmico de uma bateria cilíndrica de íon de lítio 18650 integrada em PCM.

Além disso, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Validar o modelo numérico com dados disponíveis na literatura;
- Investigar a influência da integração do PCM com a bateria sobre os campos de temperatura;
- Avaliar o impacto da corrente empregada na bateria sobre os campos de temperatura;
- Avaliar a influência da direção da bateria (vertical e horizontal) sobre os campos de temperatura.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho será dividido em: Revisão bibliográfica, onde serão apresentados dados e informações de outros artigos similares ao tema em questão servindo de base para realização do trabalho; Metodologia, onde são apresentados todos os modelos e as simulações utilizadas para a troca térmica, incluindo as condições iniciais e de contorno utilizadas, bem como as hipóteses adotadas no estudo; Resultados, onde serão apresentados as soluções obtidas e que buscam atender o objetivo geral e específico do trabalho; Conclusão, onde, finalmente, os principais pontos alcançados por meio do trabalho são enfatizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo a seguir apresenta uma análise das metodologias empregadas por diferentes pesquisadores em temas correlatos ao deste estudo, com ênfase nas abordagens adotadas para a bateria e para o PCM. Como dito anteriormente, a bateria de íon-lítio é amplamente utilizada, porém o controle térmico da mesma representa um desafio. Como ponto de partida no assunto, aqui aborda-se primeiramente a importância da segurança de manter a bateria sob temperatura ideais e em seguida trabalhos similares acerca do resfriamento dessas baterias, e trabalhos relacionados ao uso de PCM para o controle térmico.

2.1 A BATERIA DE ÍON-LÍTIO E SEU CONTROLE TÉRMICO

Em geral, manter um material dentro dos limites de temperaturas especificados pelo fabricante é de suma importância para que ocorra um funcionamento eficaz e duradouro do mesmo. Esse mesmo pensamento se encaixa no uso de baterias íon-lítio, pois sabe-se que é perigoso quando uma quantidade excessiva de calor é gerada na bateria, podendo provocar inflação de gás e até explosão, como o exemplificado na Figura 6. Acidentes com baterias de íon de lítio geralmente são causados por curtos-circuitos internos (Lee, Kim & Lee (2024)), que promovem o aumento da temperatura para um limite crítico, resultando em uma fuga térmica. Assim, o controle da temperatura é essencial para que o efeito em cascata de uma fuga térmica seja evitado.

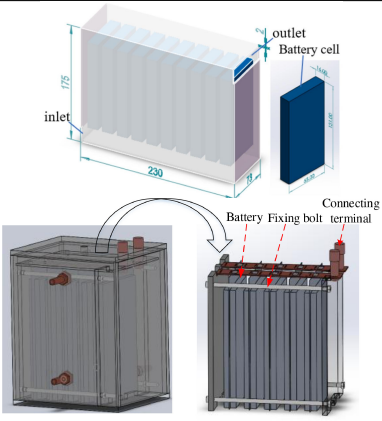
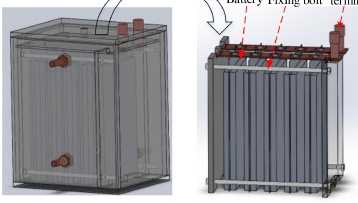
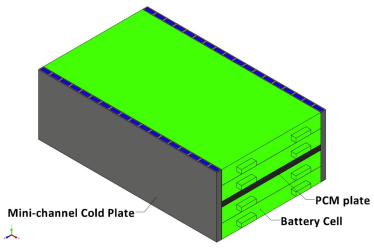
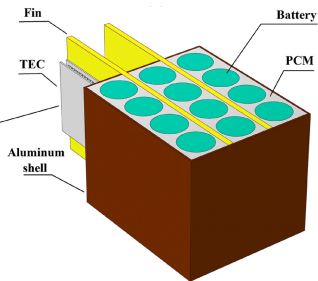
Figura 6 – Bateria de lítio após explosão



Fonte: Adaptado de Rocha (2015.).

No intuito de revisar bibliograficamente pesquisas relacionadas ao controle térmico de baterias, alguns trabalhos foram explorados, como por exemplo, o trabalho de (Zhang *et al.* (2024)), onde os autores conduziram uma breve revisão de diversos estudos envolvendo gerenciamento térmico para baterias de íon-lítio. Entre as técnicas citadas encontram-se desde o resfriamento forçado com ar e água, por dispositivo termoelétrico e por PCM. A Tabela 1 reúne alguns dos modelos apresentados.

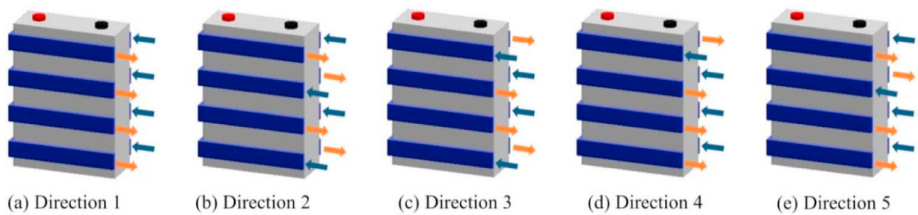
Tabela 1 – Casos de gerenciamento térmico de baterias de íon-lítio

Tipo de bateria	Forma de resfriamento	Estrutura
Prismático	Ar forçado	
Pouch	Imersão líquida	
Cilíndrica	PCM convencional	
Prismático	PCM + resfriamento líquido	
Cilíndrico	PCM + resfriamento termoeletrico	

Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2024).

O artigo de (Lan *et al.* (2016)) investigou o desempenho de um sistema de resfriamento baseado em mini-canais em um bloco de alumínio acoplado em uma célula de íon-lítio, conforme a Figura 7. Testando diferentes configurações de orientação e vazão, o sistema conseguiu reduzir de forma eficiente e satisfatória a temperatura máxima da célula de íon-lítio e seu gradiente, sob relativo baixo consumo de energia pela bomba hidráulica.

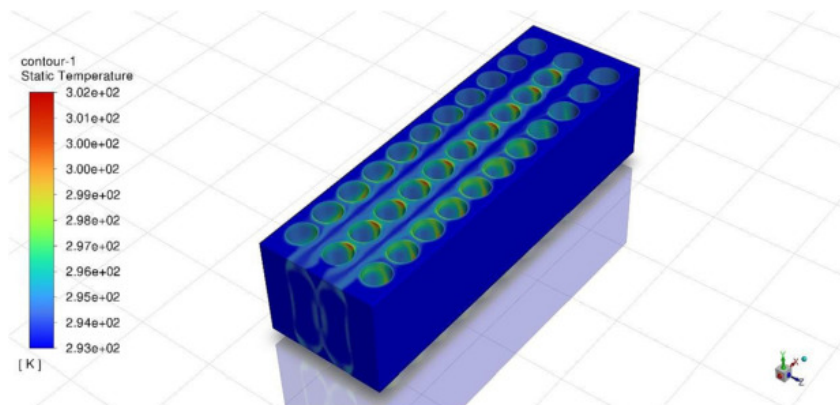
Figura 7 – Resfriamento por microcanais



Fonte: Lan *et al.* (2016).

No artigo de (Adhikari, Bhandari & Joshi (2024)) foi realizada uma análise térmica abrangente de um módulo de baterias de íon-lítio utilizado em veículos elétricos, com diferentes estratégias de resfriamento. Por meio de simulações, foram comparados métodos de resfriamento direto (com óleo mineral), indireto (com solução aquosa de etileno glicol), conforme domínio ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Análise térmica de diferentes métodos de resfriamento



Fonte: Adhikari, Bhandari & Joshi (2024).

Os resultados mostraram que o resfriamento indireto com solução de etileno glicol a 30% apresentou o melhor desempenho térmico, com extração de calor de 8,83 W e temperatura média próxima de 293,7 K. Apesar do bom desempenho do óleo mineral em alta vazão (0,04 m/s), o consumo elevado da bomba compromete sua viabilidade. O sistema de resfriamento por ar se mostrou menos eficiente, porém mais adequado em aplicações com baterias menores, por demandar menos energia.

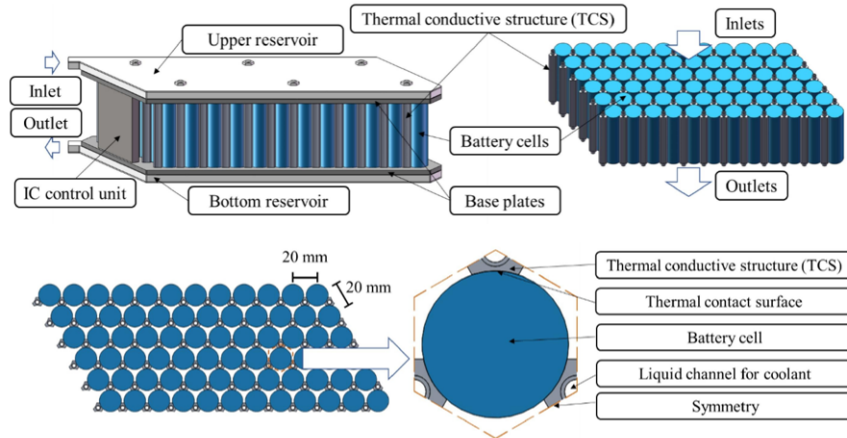
O trabalho de (Lai *et al.* (2019)) consiste no gerenciamento térmico por meio de um resfriamento líquido compacto (Figura 9), visando controlar a temperatura máxima e o gradiente de temperatura de um conjunto de baterias de íons de lítio. No modelo numérico desenvolvido, uma estrutura condutora com três superfícies de contato curvas foi projetada para resfriar a bateria cilíndrica, sendo avaliado as influências da taxa de fluxo de massa, diâmetro interno, altura da superfície de contato e ângulo da superfície de contato da estrutura. Os resultados indicam a possibilidade de manter a temperatura máxima em 40° C e um gradiente inferior a 5° C para uma vazão de 1×10^{-4} kg/s de água pelos canais.

No artigo de (Shahid & Agelin-Chaab (2024)) foi desenvolvido e analisado experimentalmente um sistema híbrido de gerenciamento térmico aplicado a um módulo de baterias cilíndricas de íon-lítio. Esse sistema combina o uso de material com mudança de fase composto (CPCM), placas frias com líquido estacionário e resfriamento por ar, conforme ilustrado na Figura 10.

Os resultados demonstraram que o sistema foi capaz de limitar a temperatura máxima das células a 27,8° C e garantir alta uniformidade térmica (0,4° C). O estudo também permitiu reduzir o volume do CPCM em até 50%, mantendo o desempenho térmico satisfatório.

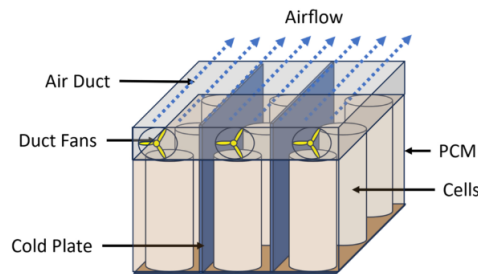
(Wagh & Saha (2024)) desenvolveram um estudo numérico sobre o gerenciamento térmico para baterias de íon-lítio, focando na combinação de materiais de mudança de fase (PCM) com aletas internas e estendidas. O objetivo do trabalho foi otimizar o tempo de recuperação térmica do PCM e reduzir os picos de temperatura das baterias quando estão em trabalho. Utilizando um modelo numérico, o estudo simulou diferentes configurações de espessura do PCM, número e extensão das

Figura 9 – Módulo de resfriamento de bateria



Fonte: Adaptado de Lai *et al.* (2019).

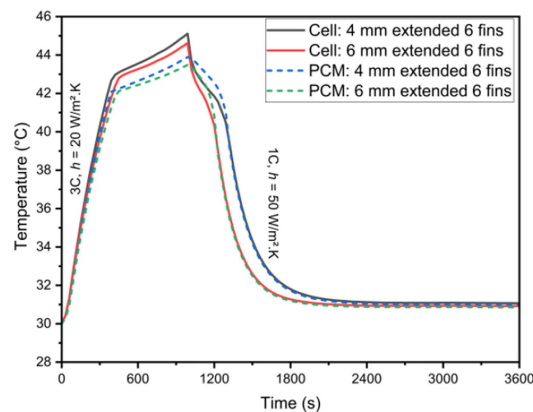
Figura 10 – Estratégia híbrida de resfriamento com PCM, placas frias e ar



Fonte: Shahid & Agelin-Chaab (2024).

aletas, além de coeficientes de transferência de calor por convecção. Os resultados demonstraram que a adição de uma camada de PCM de 2 mm reduziu a temperatura máxima da célula em até $28,2^{\circ}\text{C}$ em comparação ao uso da bateria sem PCM. Além disso, a incorporação de seis aletas internas e a extensão das aletas em até 6 mm permitiu uma redução adicional de temperatura e uma significativa aceleração no tempo de solidificação do PCM. A abordagem proposta mostrou-se eficaz em manter a temperatura das baterias abaixo de 58°C (no pior caso), durante ciclos de carga e descarga (3C1C), mesmo sob temperaturas ambientes elevadas (até 40°C). A Figura 11, por exemplo, ilustra a influência do comprimento das aletas estendidas na eficiência do resfriamento passivo.

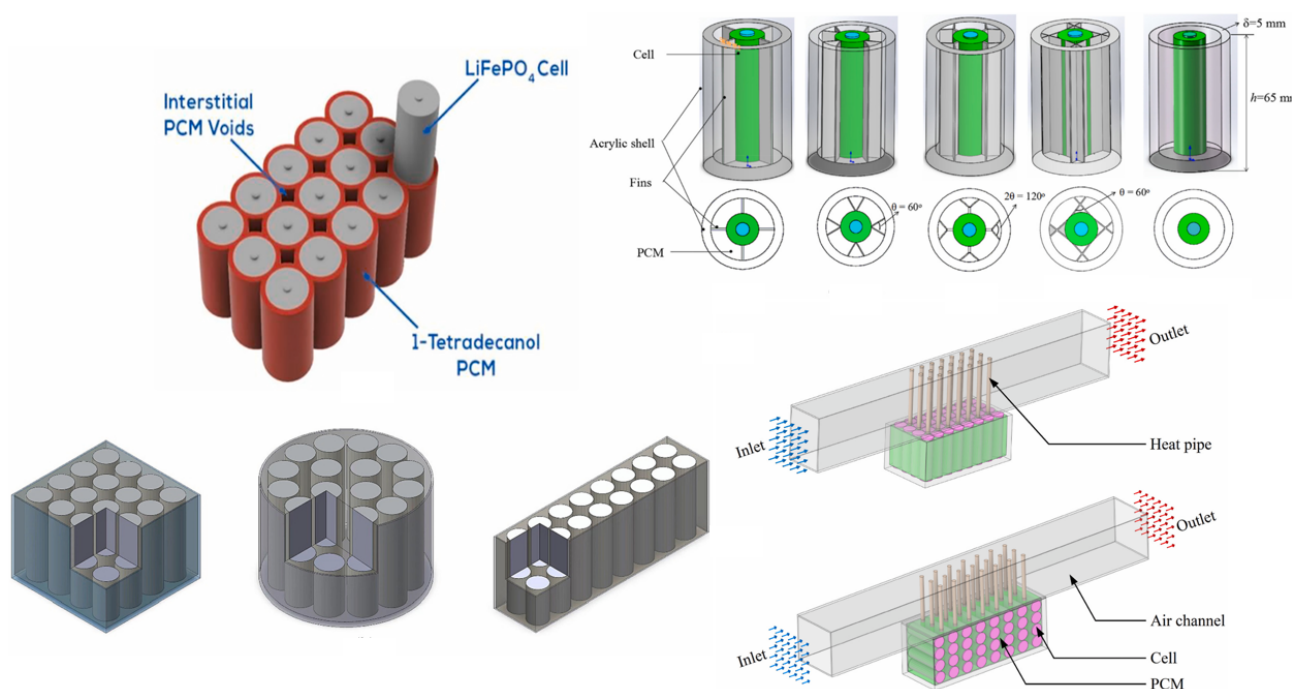
Figura 11 – Efeito do comprimento das aletas estendidas nas temperaturas da célula e do PCM



Fonte: Wagh & Saha (2024).

Por fim, (Haddad *et al.* (2024)) realizou uma revisão extensa sobre os avanços nos sistemas de gerenciamento térmico aplicados à bateria de íon de lítio, com o foco no uso de nanofluidos e materiais de mudança de fase (PCM). Os autores destacam que o controle eficaz da temperatura é essencial para garantir a segurança, prolongar a vida útil e manter o desempenho das baterias. Abordando técnicas ativas e passivas, os PCMs e os nanofluidos mostraram-se como técnicas promissoras. Para fins de comparação, os autores dividiram a pesquisa em três partes, sendo: uso exclusivo de nanofluidos, uso exclusivo de PCM e a combinação de ambos. Os nanofluidos, compostos por partículas em nanoescala dispersas em fluidos base, aumentam a condutividade térmica de forma significativa e a capacidade de resfriamento dos sistemas, melhorando a uniformidade da temperatura dentro dos módulos de bateria. Já os PCMs são destacados por sua capacidade de absorver e liberar grandes quantidades de calor, principalmente, durante a mudança de fase, mantendo a temperatura estável por longos períodos. No entanto, sua baixa condutividade térmica é uma desvantagem, mas que pode ser mitigada com a adição de materiais altamente condutivos, como nanopartículas de carbono, espumas metálicas e a incorporação de aletas. Já a abordagem híbrida de nanofluido e PCM combina as vantagens de ambas as técnicas para otimizar o gerenciamento térmico sem aumentar significativamente o consumo de energia. Algumas das combinações revisadas por (Haddad *et al.* (2024)) são apresentadas na Figura 12.

Figura 12 – Combinação de refrigeração ativa e passiva



Fonte: Haddad *et al.* (2024).

2.2 O MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE - PCM

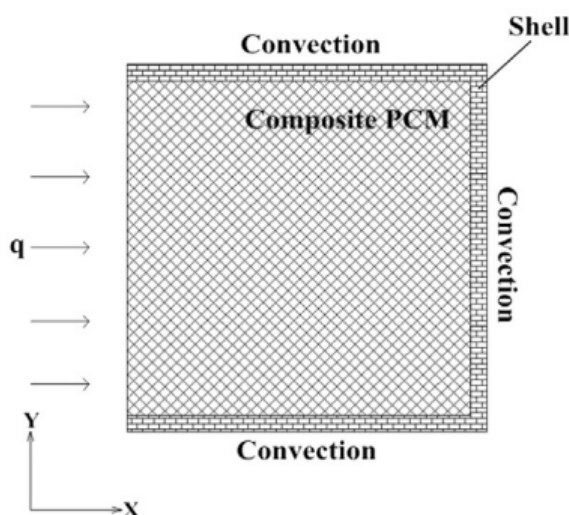
Como demonstrado anteriormente, o fenômeno de mudança de fase para fins de controle térmico tem sido amplamente investigado em diversos estudos experimentais. No entanto, uma das suas

principais desvantagens consiste na sua baixa condutividade térmica, que dificulta a transferência de calor em seu interior e pode limitar o seu desempenho.

Nesse sentido, ressalta-se o artigo de (Joshi & Rathod (2019))0, que aborda a melhoria do transporte térmico em sistemas de armazenamento de energia térmica latente (LHTES), envolvendo o uso de espuma metálica envolta de um PCM. A pesquisa busca otimizar a condutividade térmica efetiva do conjunto ao usar uma abordagem de preenchimento parcial da espuma metálica para aumentar a eficiência do processo de fusão sem alterar o tempo total de fusão. O estudo sugere que o uso seletivo da espuma metálica, apenas nas regiões de maior gradiente térmico, em virtude da baixa condutividade térmica do PCM, maximiza a eficiência térmica do sistema, aumenta a capacidade de armazenamento de energia e reduz custos e peso.

De forma similar, o artigo de (Zhang *et al.* (2017)) propõe um estudo experimental e numérico voltado à avaliação da fusão de um PCM puro e integrado com uma espuma metálica, conforme ilustrado na Figura 13, para uma seção quadrada. Os resultados indicam que no estágio inicial, a condução de calor é o mecanismo dominante de transferência de calor, sendo superada pela convecção natural em estágios mais avançados dos testes.

Figura 13 – Geometria avaliada por Zhang *et al.* (2017)

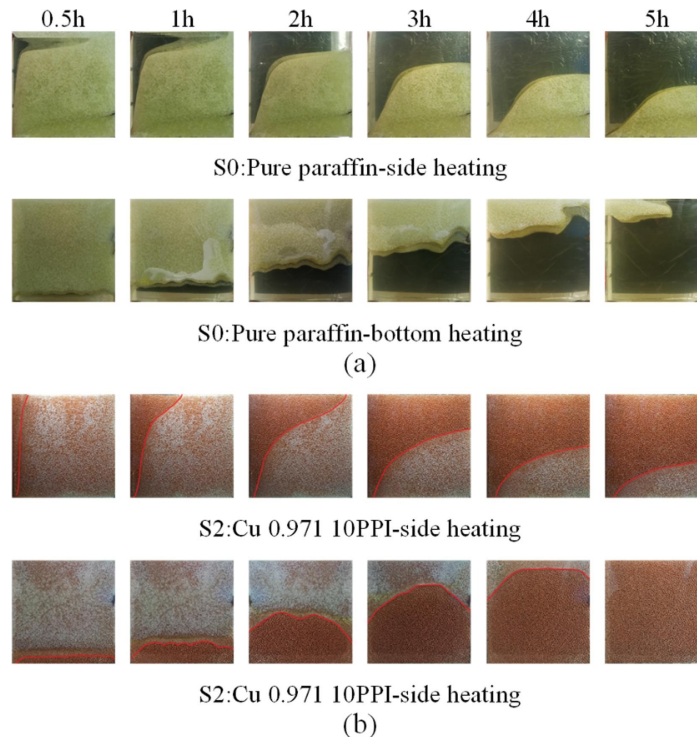


Fonte: Zhang *et al.* (2017).

Ainda, o estudo de (Zhang *et al.* (2022)) também busca explorar o impacto que a posição da fonte de calor tem sobre o comportamento térmico do PCM ao longo do tempo. Além disso, os autores avaliam o desempenho térmico do PCM puro e outras cinco configurações de PCM imerso em espumas metálicas. O objetivo principal nos testes com espumas é comparar como as suas propriedades térmicas (condutividade) e estruturais (porosidade, densidade de poros) podem melhorar a condutividade térmica efetiva do sistema e, conseqüentemente, melhorar o desempenho térmico, potencializando as aplicações de tecnologias voltadas ao armazenamento de energia térmica e estabilidade térmica. No que se refere à posição da fonte de calor, o foco está no fenômeno de convecção natural, que é impactado pela sua orientação em relação ao vetor gravidade. Nesse sentido, nota-se pela Figura 14 que, quando o fluxo de calor está na direção do vetor gravidade mas em sentido oposto, uma maior quantidade de PCM está na fase líquida, por ser uma condição em que a convecção natural é favore-

cida. Nesta figura também percebe-se o impacto do aumento da condutividade efetiva sobre a frente de fusão e fração líquida do PCM, acelerando o processo mudança de fase com a inclusão da espuma metálica.

Figura 14 – Modelos avaliados por Zhang *et al.* (2022)



Fonte: Zhang *et al.* (2022).

Diante do exposto, percebe-se que o emprego de PCM como controle térmico de processos é uma alternativa promissora, porém apresenta desafios devido à sua limitada condutividade térmica. Assim, os próximos capítulos desta pesquisa busca explorar os fundamentos da modelagem de uma bateria imersa em um PCM puro, sem a inclusão de espumas metálicas.

3 METODOLOGIA

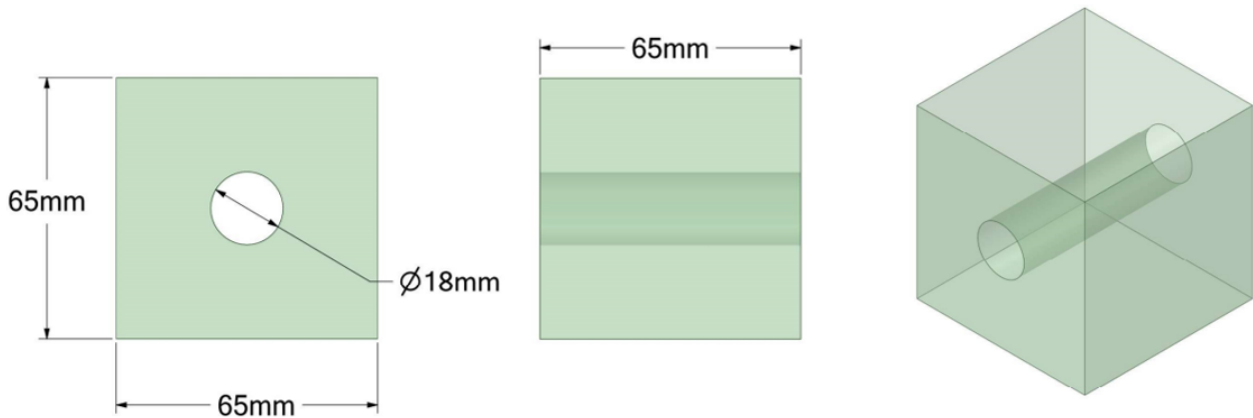
Para o desenvolvimento deste estudo, uma modelagem numérica em Mecânica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) foi desenvolvida, baseando-se principalmente no estudo numérico envolvendo PCM, realizado por (Zhang *et al.* (2017)), e na modelagem da bateria efetuada por (Lai *et al.* (2019)).

3.1 GEOMETRIA

3.1.1 PCM - caixa

Para as análises envolvendo a bateria integrada no PCM, a geometria de PCM utilizada para alojar a bateria no seu interior está na Figura 15:

Figura 15 – Dimensões e vistas da caixa de PCM



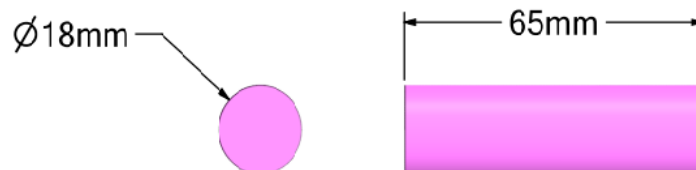
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No seu centro há um espaço vazio, que será ocupado pelo domínio da bateria.

3.1.2 Bateria

Na Figura 16 encontra-se o domínio da bateria, representativo de uma bateria de íon-lítio 18650.

Figura 16 – Dimensões da bateria

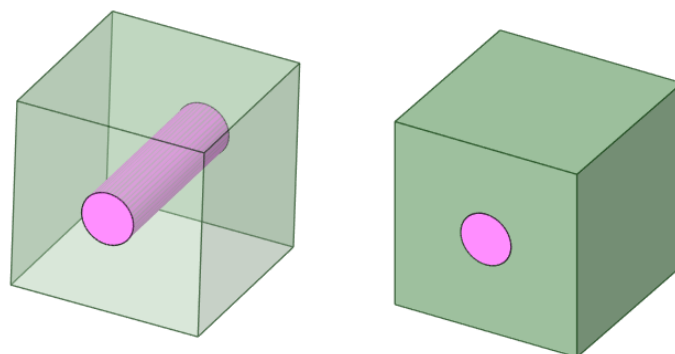


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.1.3 Geometria integrada

A integração do PCM e da bateria utiliza as mesmas geometrias mostradas anteriormente, resultando no modelo da Figura 17. Como se observa, as extremidades da bateria (rosa) coincidem com as faces do bloco de PCM (verde). Este domínio integrado será utilizado para avaliar o impacto da corrente elétrica e orientação da bateria sobre o desempenho térmico do conjunto.

Figura 17 – Bateria integrada no PCM

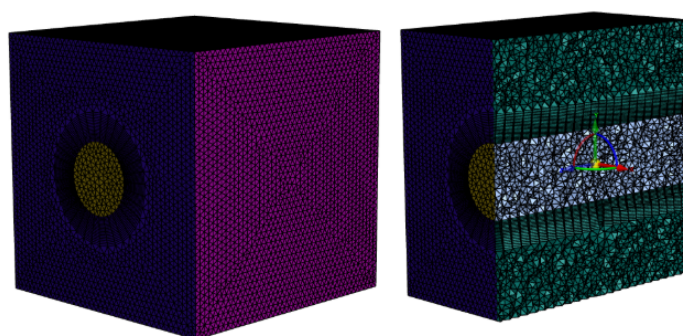


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.2 MALHA

Com base na geometria, um conjunto de malhas foi gerada com o intuito de equilibrar refinamento da malha e gasto computacional. No total foram utilizadas 595000 volumes hexaédricos, sendo a qualidade ortogonal mínima de 0,10 e média de 0,75.

Figura 18 – Malha gerada para as simulações



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como complemento, para a zona de transição, para que seja uma transição suave, foi utilizado um refinamento da malha, sendo 18 camadas refinadas com a razão de 0,2 e taxa de crescimento 1.

3.3 MODELAGEM NUMÉRICA

Os fenômenos a serem modelados consideram as seguintes hipóteses: regime transiente, fluido newtoniano, modelo tridimensional, escoamento incompressível, escoamento laminar, empuxo base-

ado no modelo de Boussinesq, modelo de entalpia-porosidade, dissipação viscosa nula, troca de calor por radiação nula e variação volumétrica nula, Propriedades materiais constantes em cada fase.

Para realizar as simulações em CFD desta pesquisa, emprega-se o *software Ansys Fluent 2024 R1*, que se baseia no método dos volumes finitos. As equações de conservação utilizadas estão apresentadas abaixo, para cada domínio da simulação.

3.3.1 PCM

As equações a serem resolvidas no domínio do PCM são, cuja referência utilizada foi dos autores (Voller & Prakash (1987)):

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \vec{U} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{U} + \rho_{ref} \vec{g} \alpha (T - T_{ref}) - \frac{(1-\beta)^2}{\beta^3 + \delta} A_m \vec{U} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\vec{U} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho L \frac{\partial \beta}{\partial t} \quad (3)$$

Onde $\vec{U}$ é o vetor velocidade, ρ é a densidade, t é o tempo, p é a pressão estática, μ é a viscosidade dinâmica, ρ_{ref} é a densidade de referência, $\vec{g}$ é o vetor aceleração da gravidade, α é o coeficiente de expansão térmica, T é a temperatura, T_{ref} é a temperatura de referência, β é a fração líquida, A_m é o coeficiente de porosidade, δ é um termo introduzido para eliminar a divisão por zero, constante de taken, H é a entalpia do material, k é o coeficiente de transferência de calor por condução e L é calor latente de fusão.

A fração líquida é definida pela Equação 4, onde $\beta = 0$ na fase sólida, $\beta = 1$ na fase líquida e na região pastosa β varia entre 0 a 1.

$$\beta = \begin{cases} 0, T < T_s \\ (T - T_s)/(T_l - T_s), T_s \leq T < T_l \\ 1, T \geq T_l \end{cases} \quad (4)$$

Os parâmetros T_s e T_l são as temperaturas do sólido (na iminência da fusão) e do líquido (na iminência da solidificação), respectivamente.

A aproximação de Boussinesq introduz um força de corpo (empuxo) na equação da conservação da quantidade de movimento, produzindo o efeito de convecção natural da fase líquida por meio do tratamento da densidade como uma função da temperatura (Edison (2013.)), conforme observado no segundo termo do lado direito da equação da quantidade de movimento.

3.3.2 Bateria

A bateria consiste em um domínio do tipo sólido, onde somente a seguinte equação de conservação da energia é resolvida:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla T + \dot{q} \quad (5)$$

Nesta equação, c_p é o calor específico à pressão constante e $\dot{q}$ é o calor gerado internamente pela bateria, durante seu uso.

Neste estudo, foi adotado o modelo térmico de parâmetros concentrados proposto por Bernardi, Pawlikowski & Newman (1985)), onde a geração interna de energia $\dot{q}$ [W/m³] é dada pela seguinte equação:

$$\dot{q} = \frac{I}{V_b} \left[IR + T \frac{\partial U_0}{\partial T} \right] \quad (6)$$

onde V_b é o volume da bateria [m³], I é a corrente [A], R é a resistência interna equivalente [m.Ω] e $\partial U_0 / \partial T$ é o coeficiente térmico de entropia [m.V] e T é a temperatura da bateria [K].

A resistência interna da bateria (R) e o coeficiente térmico de entropia ($\frac{\partial U_0}{\partial T}$) variam em função da temperatura da bateria e do estado de carga (SoC - State of Charge). Conforme descrito na literatura, a resistência interna da bateria pode ser expressa pelas seguintes equações:

$$R = \begin{cases} 992 \times SoC^6 - 3406 \times SoC^5 + 4667 \times SoC^4 - 3263 \times SoC^3 + 1225 \times SoC^2 - 233 \times SoC + 48, T = 60^\circ C \\ 1559 \times SoC^6 - 5374 \times SoC^5 + 7367 \times SoC^4 - 5121 \times SoC^3 + 1898 \times SoC^2 - 355 \times SoC + 58, T = 50^\circ C \\ 1559 \times SoC^6 - 5365 \times SoC^5 + 7378 \times SoC^4 - 5181 \times SoC^3 + 1962 \times SoC^2 - 382 \times SoC + 66, T = 40^\circ C \\ 2989 \times SoC^6 - 10480 \times SoC^5 + 14700 \times SoC^4 - 10514 \times SoC^3 + 4036 \times SoC^2 - 793 \times SoC + 107, T = 30^\circ C \\ 4301 \times SoC^6 - 15496 \times SoC^5 + 22391 \times SoC^4 - 16531 \times SoC^3 + 6559 \times SoC^2 - 1334 \times SoC + 166, T = 20^\circ C \end{cases} \quad (7)$$

Quando a temperatura está entre dois valores específicos, neste trabalho utiliza-se um método de interpolação linear para calcular a resistência.

O coeficiente térmico de entropia, que reflete a variação de U_0 com a temperatura sob tensão constante, é expresso como:

$$\frac{\partial U_0}{\partial T} = -0,355 + 2,154 \times SOC - 2,869 \times SOC^2 + 1,028 \times SOC^3 \quad (8)$$

Por fim, o estado de carga (SoC) indica a quantidade de carga restante na bateria, sendo calculado como a proporção da capacidade restante em relação à capacidade total. Matematicamente, o SoC é calculado da seguinte forma:

$$SOC = SOC_{in} - \frac{It}{Q_c} \quad (9)$$

Onde SOC_{in} é a carga inicial da bateria (definida como 1 neste trabalho), Q_c é a capacidade total da bateria [Ah], e por fim o produto entre a corrente elétrica I e o tempo t é a carga drenada ao longo do tempo.

3.4 CONDIÇÕES INICIAIS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Como condição inicial tem-se uma temperatura uniforme de 20° C em todo o domínio, resultando na condição inicial de fase sólida para o PCM. Nas paredes do domínio foi considerada a condição de não escorregamento juntamente com perda de calor por convecção natural com o ar na temperatura constante de 20 °C.

Para as paredes externas horizontais o coeficiente de troca de calor por convecção, foi utilizado o mesmo equacionamento de (Zhang *et al.* (2017)), qual é dado por:

$$h = \frac{0,62k}{D}(GrPr)^{1/5} \quad (10)$$

Para as paredes verticais o coeficiente é:

$$h = \frac{0,59k}{D}(GrPr)^{1/4} \quad (11)$$

Onde D é o comprimento característico da parede, Pr é o numero de Prandtl e Gr é o numero de Grashof. O número de Prandtl é uma razão de difusividade de momento e difusividade térmica de um fluido, dada pela seguinte equação:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (12)$$

O número de Grashof fornece a relação entre a força de empuxo de um escoamento e a força viscosa e é dado pela seguinte equação:

$$Gr = \frac{g\alpha(T - T_{ref})D^3}{\nu} \quad (13)$$

Onde α é o coeficiente de expansão térmica e ν é a viscosidade cinemática.

3.5 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

A Tabela 2 reúne as propriedades materiais utilizadas na simulação.

3.6 PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

Como esquema numérico para as análises, os campos de pressão e velocidades foram calculados utilizando o método semi-implícito de segunda ordem (SIMPLE) com discretização espacial da pressão utilizando o modelo (PRESTO) e de segunda ordem para o momento e energia, empregando até 20 iterações por passo para a convergência dos resíduos. Como critério de convergência foi adotado um resíduo de velocidade e continuidade de 1×10^{-4} e de energia 1×10^{-6} .

3.7 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

A fim de demonstrar a validade da modelagem proposta anteriormente, este trabalho busca validar a modelagem do PCM e da bateria separadamente, visto que há dados reportados na literatura.

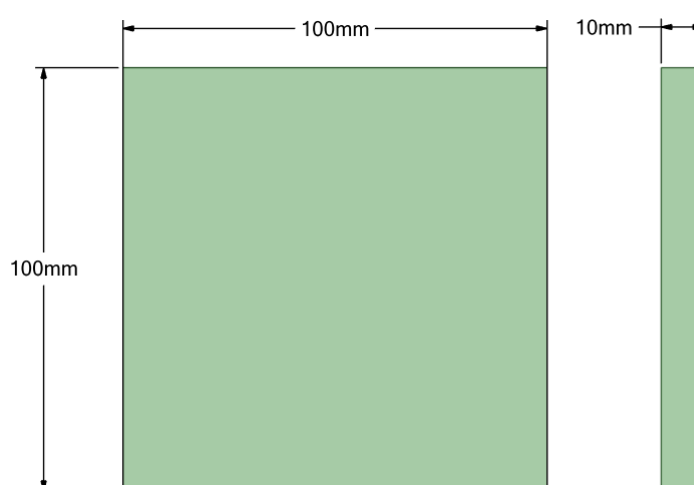
Tabela 2 – Propriedades materiais

Parâmetros	Valores
Densidade da bateria (kg/m^3)	2523
Condutividade térmica da bateria (W/mK)	1,2
Calor específico da bateria (J/kgK)	1145
Densidade do PCM (kg/m^3)	767
Calor latente do PCM (kJ/kg)	232.000
Temperatura de fusão do PCM ($^{\circ}\text{C}$)	22.0126.01
Condutividade térmica do PCM (W/mK)	0.185
Calor específico do PCM (J/kgK)	2100
Viscosidade dinâmica do PCM (kg/ms)	0.0030
Coefficiente de expansão térmica do PCM (K^{-1})	0.0006

Fonte: Xin, Wang & Xi (2023) e Aanandsundar *et al.* (2024).

Para isso, emprega-se o trabalho de (Zhang *et al.* (2017)), que avalia em CFD a fusão de um PCM para uma seção quadrada, com as dimensões da Figura 19.

Figura 19 – Geometria PCM - placa



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No trabalho, os autores empregam um fluxo de calor na lateral esquerda de $6207,51 - 0,0108t$ [W/m^2], onde t é o tempo da simulação. Nas paredes do PCM (lateral, superior, inferior, frontal e posterior) há uma camada de 5 mm de *plexyglas*.

Utilizando estes parâmetros, a validação da simulação do PCM foi realizada, sendo os resultados obtidos apresentados no próximo capítulo. Para a validação da bateria é empregado o trabalho de (Xin, Wang & Xi (2023)), que apresenta dados para a mesma bateria descrita neste capítulo.

Tabela 3 – Propriedades materiais para validação do PCM

Parâmetros	Valores
Densidade (kg/m^3)	785
Calor latente (kJ/kg)	175,24
Temperatura de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	54,43-64,11
Condutividade térmica (sólido/líquido)(W/mK)	0,3/0,1
Calor específico (J/kgK)	2850
Viscosidade dinâmica (kg/ms)	0,000365
Coeficiente de expansão térmica (K^{-1})	0,0003085
Condutividade térmica do <i>plexiglas</i> (W/mK)	0,11

Fonte: Zhang *et al.* (2017).

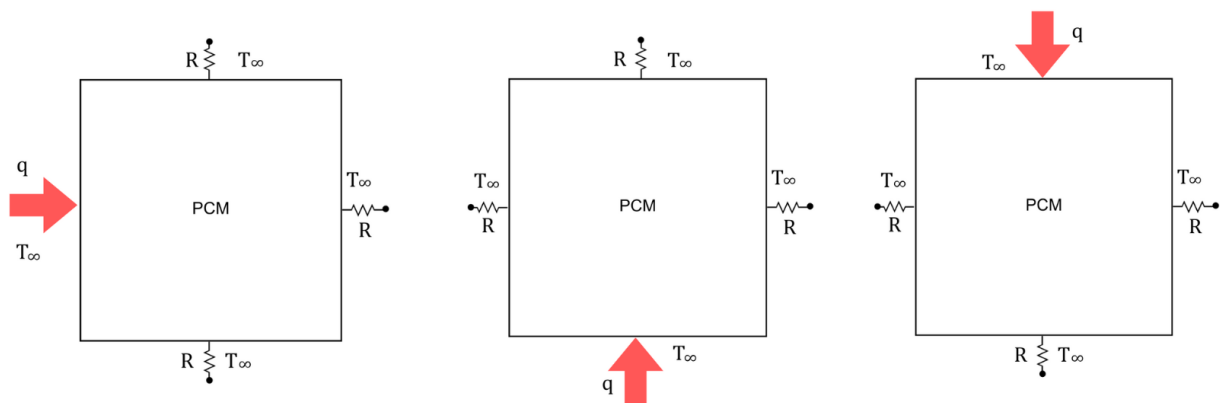
3.8 ESTUDOS DE CASO

Os estudos de casos avaliados neste trabalho buscam responder qual o impacto que a orientação da bateria e a sua corrente elétrica têm sobre os campos de temperatura e fração de líquido do domínio.

Para explorar melhor o efeito da orientação do domínio, mais especificamente da localização da fonte de calor, um dos primeiros resultados deste trabalho utiliza a geometria da Figura 19 ao invés da bateria, pois há uma restrição quanto ao máximo tempo de simulação permitido na bateria, limitado pela drenagem total de sua carga, conforme Equação 9. A finalidade deste estudo de caso é compreender o efeito da convecção natural do material em relação à força gravitacional.

Três posições diferentes de fonte de calor são avaliadas, conforme a Figura 20, onde as propriedades materiais e condições de contorno vistas em (Zhang *et al.* (2017)) são aplicadas.

Figura 20 – Posições da fonte térmica para estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

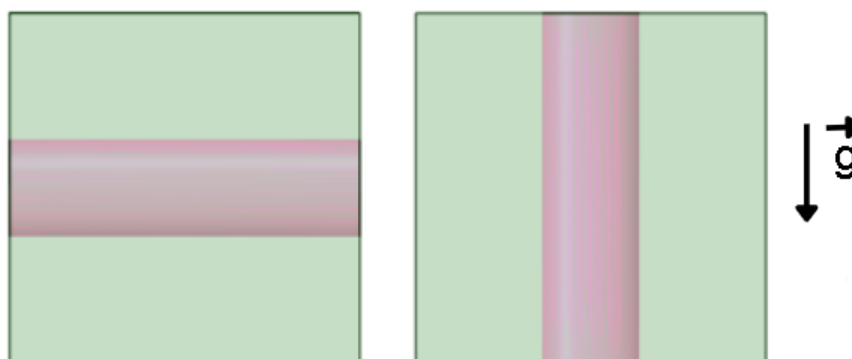
No que se refere à simulação envolvendo o PCM integrado à bateria, os estudos de caso consistem nas seguintes análises:

- Orientação da bateria (Figura 21)

- V: Vertical;
 - H: Horizontal.
- Corrente elétrica da bateria
 - $I=6\text{ A}$;
 - $I=9\text{ A}$;
 - $I=12\text{ A}$.

Por meio destes testes serão avaliadas as temperaturas mínimas, médias e máximas, tanto na bateria quanto no PCM, assim como a fração líquida no PCM.

Figura 21 – Orientação da bateria: H - horizontal (esquerda); V - Vertical (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4 RESULTADOS

Este capítulo contempla os resultados obtidos pelos modelos apresentados no capítulo anterior, onde primeiramente serão apresentados os dados de validação obtidos para o PCM e bateria separadamente para embasar os demais resultados numéricos. Na sequência, os testes envolvendo a orientação da fonte de calor no PCM são ilustrados, finalizando com os estudos de caso da bateria e PCM acoplados.

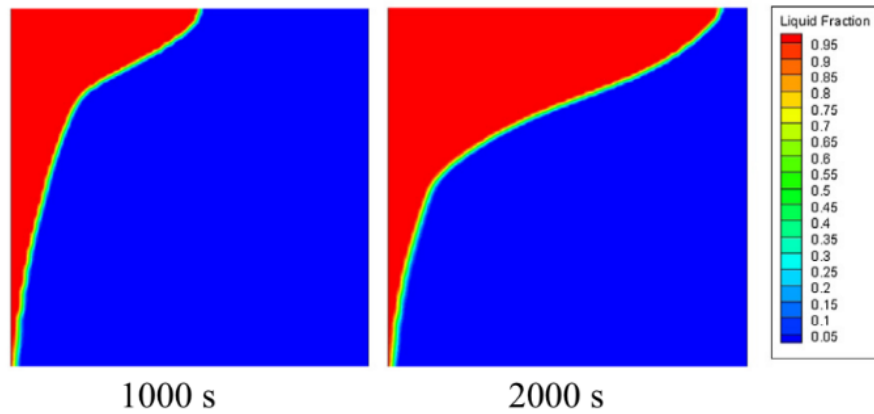
4.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1.1 PCM

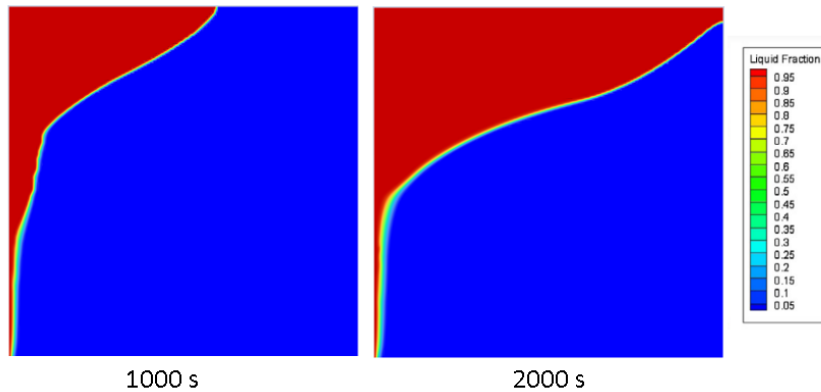
A validação dos resultados é necessária para confirmar a conformidade dos modelos empregados na simulação. Para a análise do PCM isoladamente, foi realizada uma comparação com resultados numéricos obtidos por Zhang *et al.* (2017), conforme Figura 22, onde a fração líquida é avaliada para dois instantes de tempo.

Figura 22 – Validação do modelo de PCM

(a) Zhang *et al.* (2017)



(b) Autor (2025)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

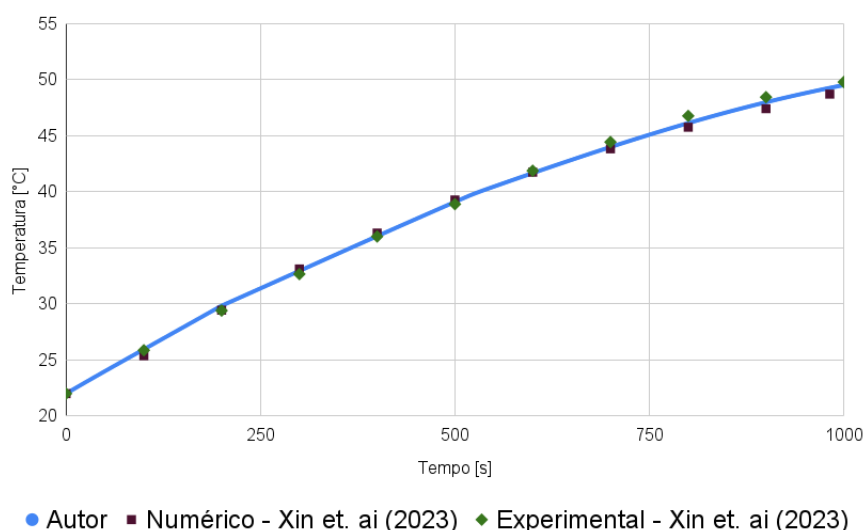
A cor vermelha indica uma região completamente líquida, a cor azul representa a porção sólida do PCM e as cores intermediárias são válidas para uma mistura simultânea de sólido e líquido. Como

pode ser observado, há similaridade entre os dados de (Zhang *et al.* (2017)) (Figura 22a) e os gerados nesta pesquisa (Figura 22b), com um avanço mais rápido na frente de fusão obtido pelo presente estudo. Entre as razões para essa diferença pode-se citar a ausência de algumas informações no trabalho de referência, como a temperatura de referência utilizada para o valor da densidade, os critérios de convergência adotados, como por exemplo os limites de resíduos, bem como a quantidade de iterações permitidas em cada passo de tempo. Ainda assim, a boa concordância geral entre os dados valida a modelagem proposta para o comportamento térmico do PCM.

4.1.2 Bateria

Para a análise da bateria, um comparativo foi realizado com o artigo de (Xin, Wang & Xi (2023)), no qual há resultados experimentais e numéricos de uma bateria com as mesmas características usadas na pesquisa. A Figura 23 mostra a temperatura na superfície externa da bateria, em um ponto localizado na região central. Como se observa, há uma boa concordância entre os resultados, o que sugere uma adequada confiabilidade ao modelo empregado.

Figura 23 – Validação do modelo da bateria



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

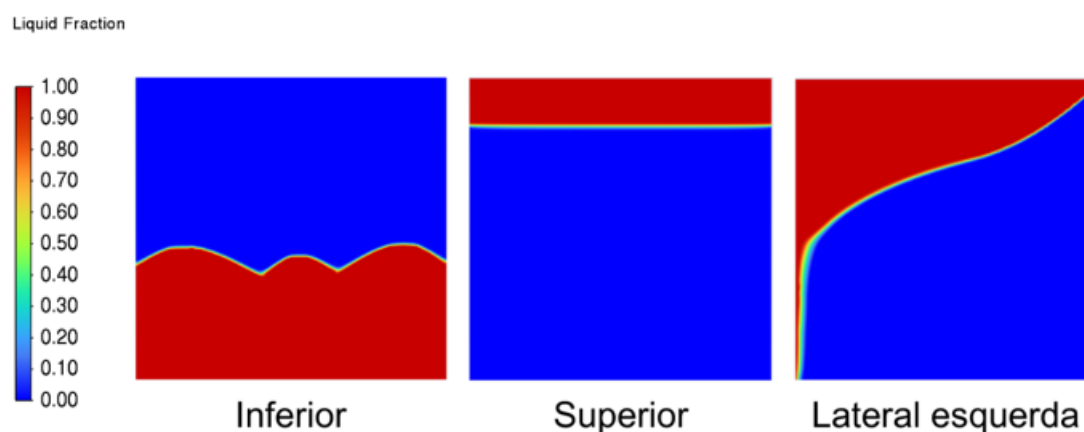
4.2 POSIÇÃO DA FONTE DE CALOR

Concluída a análise térmica do PCM e bateria com foco na validação dos resultados, parte-se agora para uma exploração mais ampla do modelo desenvolvido. Inicialmente faz-se uma avaliação da influência da posição de aquecimento no PCM, sem a bateria, conforme a geometria da Figura 19.

Os resultados para este cenário estão disponíveis na Figura 24, onde apresenta-se o campo de fração líquida obtido após 2000 s para as posições inferior (fluxo de calor vindo verticalmente de baixo para cima), superior (fluxo de calor vindo verticalmente da cima para baixo) e lateral esquerda (fluxo de calor vindo horizontalmente da esquerda para direita). Em todos os casos, as demais condições de contorno foram mantidas, assim como o restante do modelo.

Como esperado, a localização do aquecimento tem um impacto considerável devido ao efeito da convecção natural do sistema, que busca manter a região mais quente no topo. Além de variações na fração líquida total, o perfil da frente de fusão é significativamente afetado pela direção em que o calor é inserido. Assim, quando o vetor fluxo de calor é oposto ao vetor da gravidade, obtém-se um maior derretimento do PCM para um mesmo instante de tempo. Consequentemente, a fonte de calor na parte superior resulta no derretimento mais lento, enquanto o aquecimento na lateral promove um patamar intermediário de fusão.

Figura 24 – Fração líquida para diferentes posições da fonte de calor, no instante de 2000 s



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 4 apresenta os valores de fração líquida (em porcentagem) para cada caso de aquecimento. O pior caso, com aquecimento superior, é capaz de fundir apenas a metade do observado com aquecimento na lateral para um mesmo instante de tempo, e cerca de um terço do observado para aquecimento na parte inferior. Quando se compara o melhor cenário (aquecimento inferior) com o intermediário (aquecimento na lateral), há uma significativa diferença nos resultados, sendo 42% e 30%, respectivamente.

Tabela 4 – Fração líquida do PCM para as 3 diferentes posições de fonte de calor em 2000 s

Inferior	Superior	Lateral esquerda
42,48 %	15,74 %	30,18 %

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Estes resultados evidenciam que a orientação e posição da fonte de calor afetam o cenário térmico envolvendo PCM e, portanto, serão explorados também nas simulações com a bateria.

4.3 PCM E BATERIA INTEGRADOS

Os resultados envolvendo o acoplamento do PCM com a bateria passam a ser discutidos à partir desta seção. Conforme descrito no capítulo anterior, as análises envolvem três correntes elétricas (6, 9 e 12 A) e duas orientações para a bateria (horizontal e vertical).

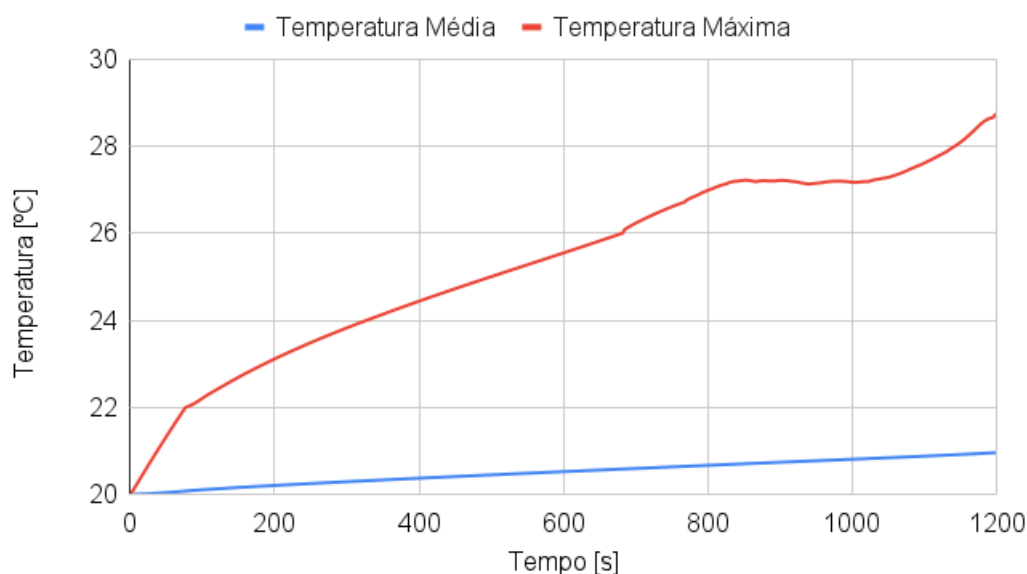
Para iniciar a discussão, primeiramente considera-se diferentes cenários de corrente na bateria, considerando sua posição na horizontal.

4.3.1 Bateria na horizontal

4.3.1.1 Corrente elétrica de 6 A

Para esta configuração de orientação e corrente, a temperatura máxima do PCM foi atingida no último instante de tempo, como esperado, com valor de $28,75^{\circ}\text{C}$, enquanto a temperatura média foi de $20,95^{\circ}\text{C}$. O último instante de 1200 s coincide com o descarregamento completo da bateria, conforme Equação 9. A temperatura mínima não é apresentada, pois manteve-se constante em 20°C , conforme campo inicial prescrito. O perfil quase linear entre 22 e 26°C é consequência do intervalo de fusão do material, que inicia pouco antes de 100 s e em aproximadamente 700 s alguma porção alcança a fusão completa em determinada parte do domínio. A temperatura média do PCM abaixo de 22°C indica que há partes do domínio que não alcançaram a fusão, nem mesmo parcialmente. A inflexão na curva próximo dos 100 s, reduzindo a sua inclinação, demonstra que o PCM reduz aumentos mais abruptos da temperatura, por meio do calor latente de fusão.

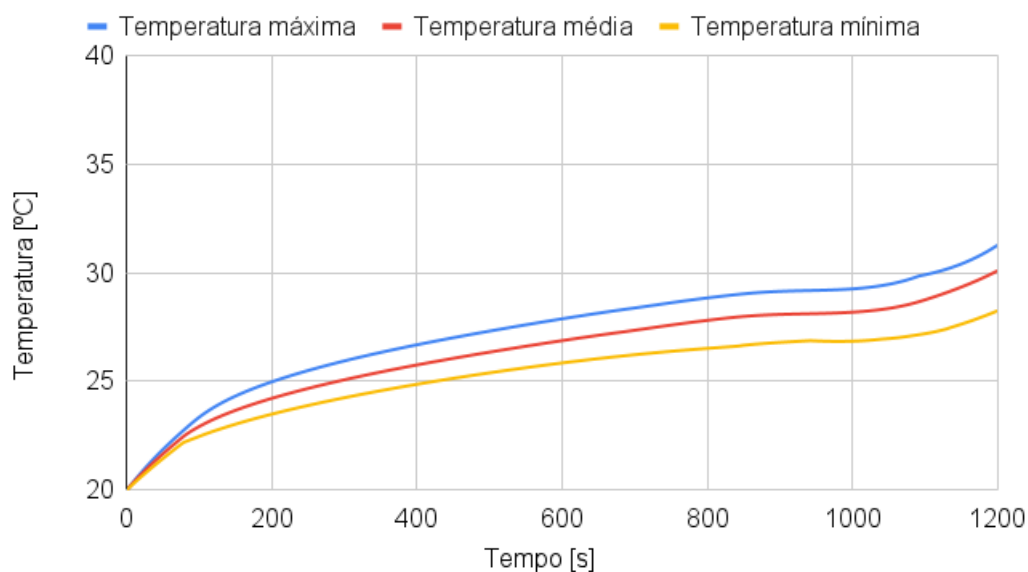
Figura 25 – Temperaturas média e máxima no PCM, com bateria na horizontal e $I = 6\text{ A}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em se tratando da bateria, os valores de temperatura máxima, média e mínima são apresentados na Figura 26. Novamente, os picos são atingidos no último instante de tempo, com valor máximo de $31,28^{\circ}\text{C}$, médio de $30,09^{\circ}\text{C}$ e mínimo de $28,05^{\circ}\text{C}$. Estes extremos evidenciam um baixo gradiente de temperatura, consequência da maior condutividade térmica da bateria, se comparado com o do PCM.

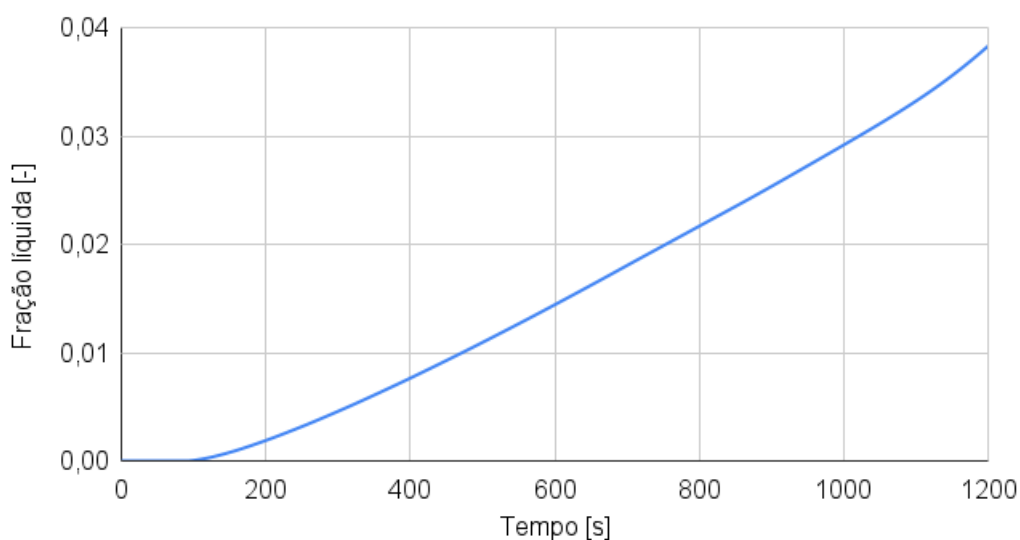
Figura 26 – Temperatura máxima, média e mínima na bateria horizontal e $I = 6$ A



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No que diz respeito a fração líquida do PCM, o maior valor obtido foi de apenas 0,039, conforme ilustrado na Figura 27. Este gráfico evidencia que a maior parte do domínio do PCM permanece no estado sólido, sem sofrer aquecimento significativo pela bateria.

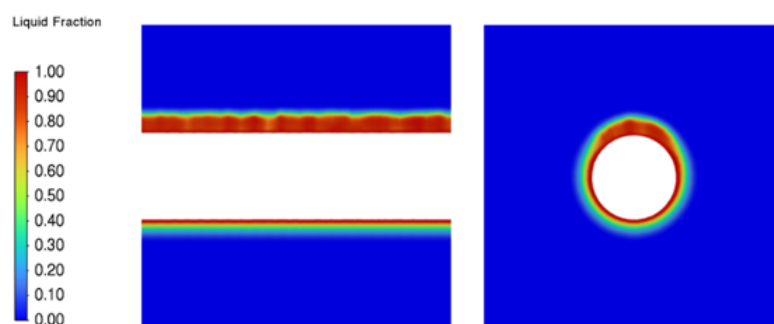
Figura 27 – Fração líquida no PCM, com bateria na horizontal e $I = 6$ A



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 28 mostra um campo bidimensional de fração líquida no instante final da simulação, que corrobora com a observação feita anteriormente de que a maior parte do domínio do PCM permanece na fase sólida. Esta imagem também demonstra que a maior parte do derretimento do material está na parte superior, devido à convecção natural. A região no centro das imagens, em branco, representa a bateria.

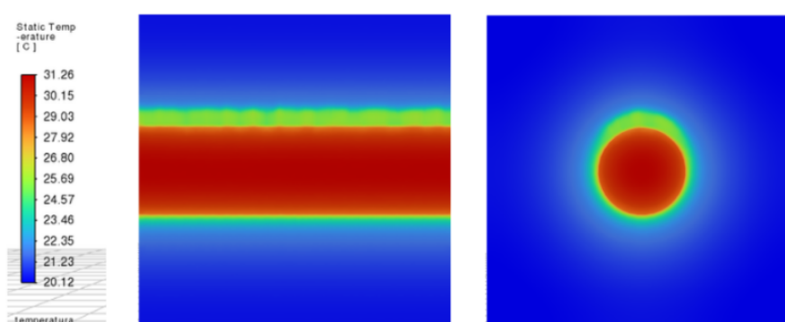
Figura 28 – Campo de fração líquida nos planos perpendicular e paralelo da bateria na horizontal, para $I = 6$ A e 1200 s



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 29 mostra o campo de temperatura de todo o domínio. O efeito da convecção natural novamente se comprova, neste caso pela temperatura maior na região superior e adjacente da bateria.

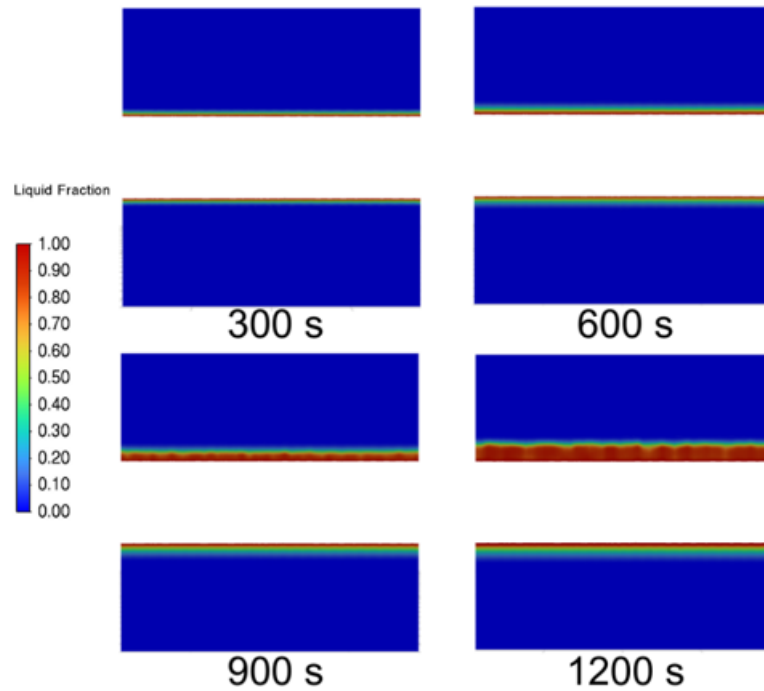
Figura 29 – Campo de temperaturas nos planos perpendicular e paralelo da bateria na horizontal, para $I = 6$ A e 1200 s



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por fim, a Figura 30 mostra o avanço da fração líquida a cada 300 s, onde nota-se o progresso da fusão e o efeito da convecção natural nas partes superiores e inferiores do PCM.

Figura 30 – Avanço do campo de fração líquida, com bateria na horizontal e $I = 6$ A

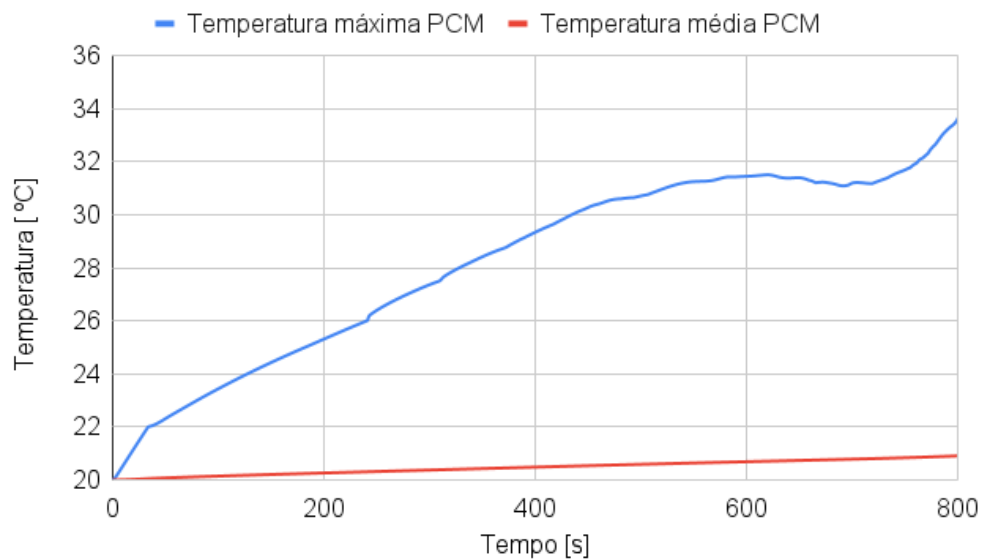


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3.1.2 Corrente elétrica de 9 A

Ao manter a orientação da bateria, porém aumentar a corrente elétrica para 9 A, tem-se o resultado da Figura 31 para a temperatura máxima e média. No último instante de tempo, o valor máximo aumentou para 33,69° C, enquanto a temperatura média permaneceu em 20,95° C.

Figura 31 – Temperaturas média e máxima no PCM, com bateria na horizontal e $I = 9$ A

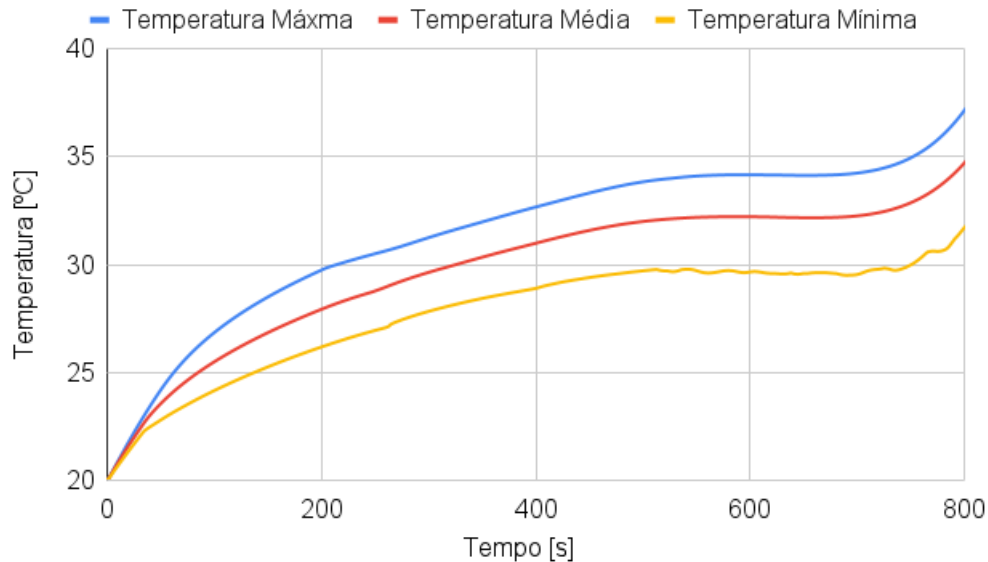


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em se tratando das temperaturas na bateria ao longo do tempo, a Figura 32 indica valores de 37,20° C, 34,20° C e 31,74° C para a máxima, média e mínima, respectivamente. Interessante notar

que estes valores aumentaram se comparado ao caso anterior, mesmo que o tempo final da simulação de 800 s, que está associado ao descarregamento total da bateria, tenha sido inferior ao caso anterior de 1200 s. No entanto, esta elevação é explicada pela Equação 6, pois o calor gerado internamente na bateria é função da corrente elevada à segunda potência.

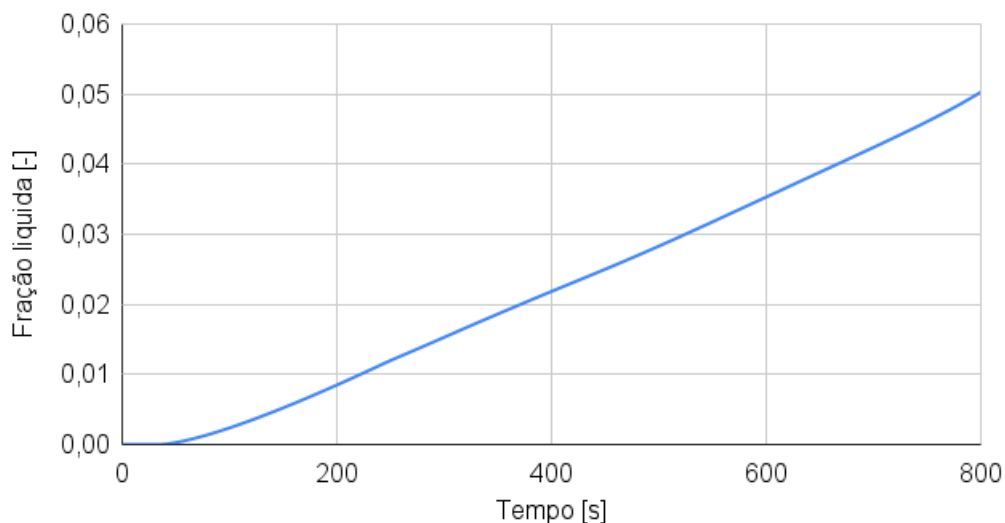
Figura 32 – Temperatura máxima, média e mínima na bateria horizontal e $I = 9$ A



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No que diz respeito a fração líquida obtida para o PCM com a bateria na posição horizontal e corrente de 9 A, há um aumento no pico de fração líquida para 0,050, que está ilustrado na Figura 33, consequência do maior aquecimento pela bateria e a consequente transferência de calor para o PCM.

Figura 33 – Fração líquida no PCM, com bateria na horizontal e $I = 9$ A

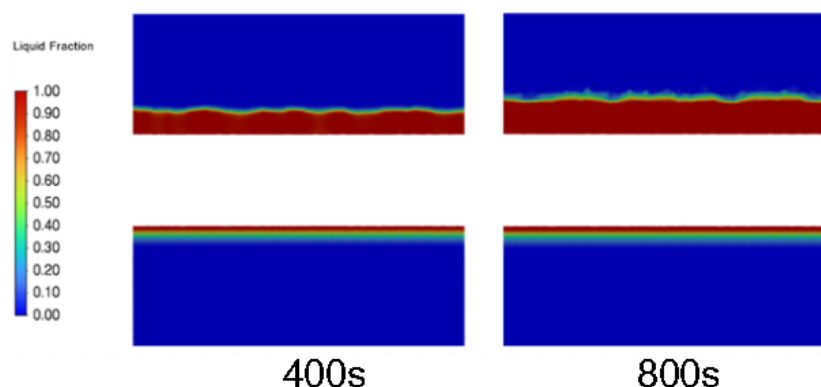


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 34 mostra o avanço da fração líquida com um avanço de imagem de 50 % do tempo

total, onde nota-se o efeito da convecção natural nas partes superiores e inferiores do PCM no plano demonstrado, em virtude do vetor gravidade.

Figura 34 – Avanço do campo de fração líquida, com bateria na horizontal e $I = 9$

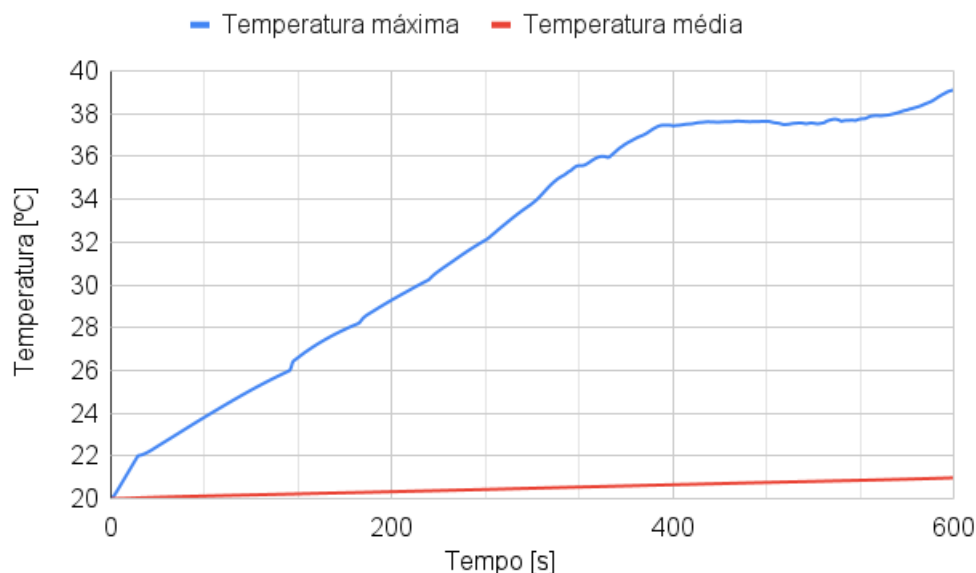


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3.1.3 Corrente elétrica de 12 A

Para este caso, observou-se que a temperatura máxima do PCM foi atingida no último instante de tempo, com valor de $39,1^{\circ}\text{C}$, enquanto a temperatura média foi de $20,9^{\circ}\text{C}$, também no último instante de tempo.

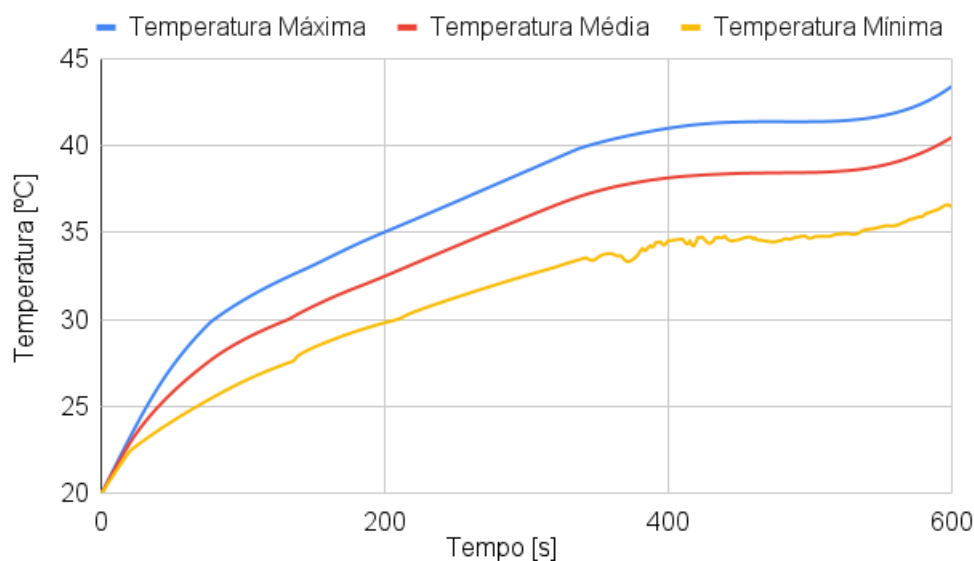
Figura 35 – Temperaturas média e máxima no PCM, com bateria na horizontal e $I = 12\text{ A}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em se tratando da temperatura máxima, média e mínima da bateria, novamente o pico ocorre no último instante de tempo, com valor de $43,4^{\circ}\text{C}$ de máximo, enquanto a temperatura média foi de $40,4^{\circ}\text{C}$ e a mínima de $36,5^{\circ}\text{C}$.

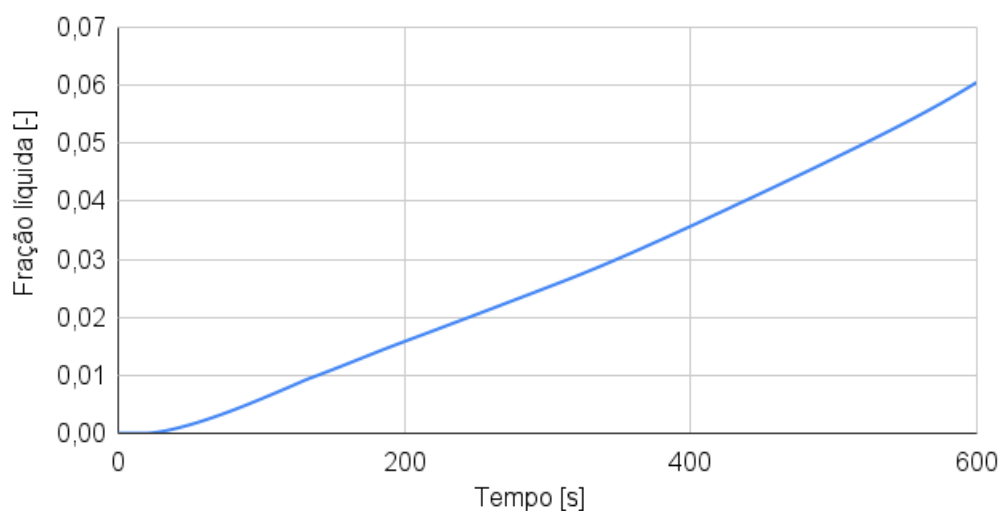
Figura 36 – Temperatura máxima, média e mínima na bateria horizontal e $I = 12$ A



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No que diz respeito a fração líquida obtida para o PCM, obteve-se um valor de fração líquida ligeiramente maior se comparado com todos os casos anteriores, alcançando o máximo de 0,060, ainda que este caso tenha o menor tempo associado.

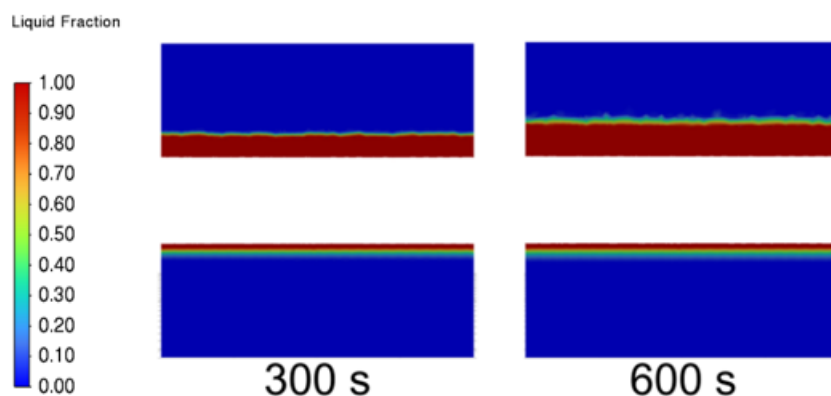
Figura 37 – Fração líquida no PCM, com bateria na horizontal e $I = 12$ A



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para finalizar este caso, a Figura 38 mostra o avanço da fração líquida com um avanço de imagem de 50 % do tempo total, onde há um sutil aumento na fração líquida, novamente mais concentrado na parte superior por consequência da convecção natural.

Figura 38 – Avanço do campo de fração líquida, com bateria na horizontal e $I = 12$



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

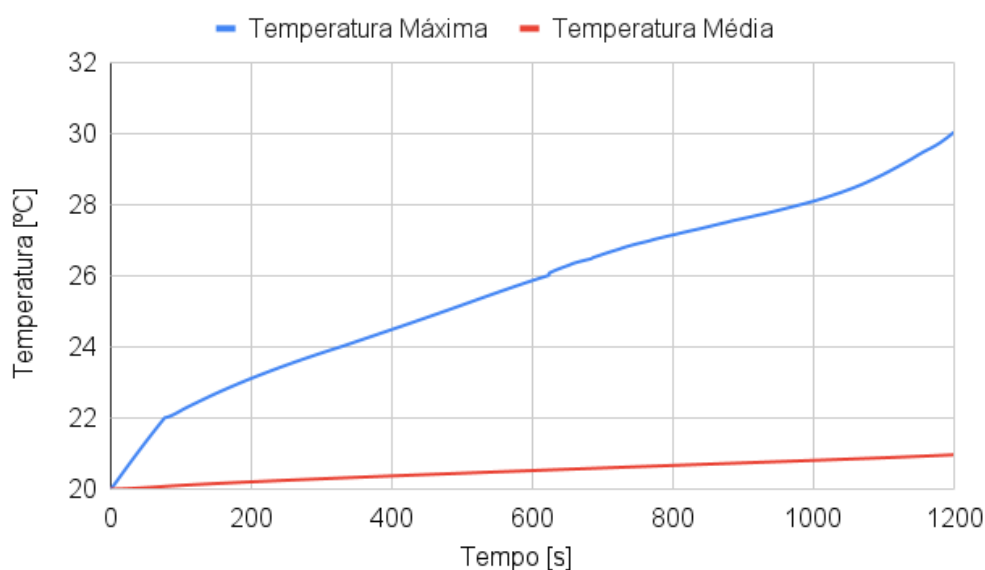
4.3.2 Bateria na vertical

Para dar continuidade à discussão, nesta seção são apresentados os resultados envolvendo os mesmos casos anteriores, exceto que agora a orientação da bateria está na posição vertical.

4.3.2.1 Corrente elétrica de 6 A

Neste caso, a temperatura máxima do PCM foi de $30,0^{\circ}\text{C}$, enquanto a temperatura média foi de $20,9^{\circ}\text{C}$, conforme apresentado na Figura 39. Comparando com o último instante de tempo da orientação horizontal da bateria, agora a temperatura máxima do PCM aumentou $1,25^{\circ}\text{C}$, enquanto manteve praticamente constante a temperatura média.

Figura 39 – Temperaturas média e máxima no PCM, com bateria na vertical e $I = 6\text{ A}$

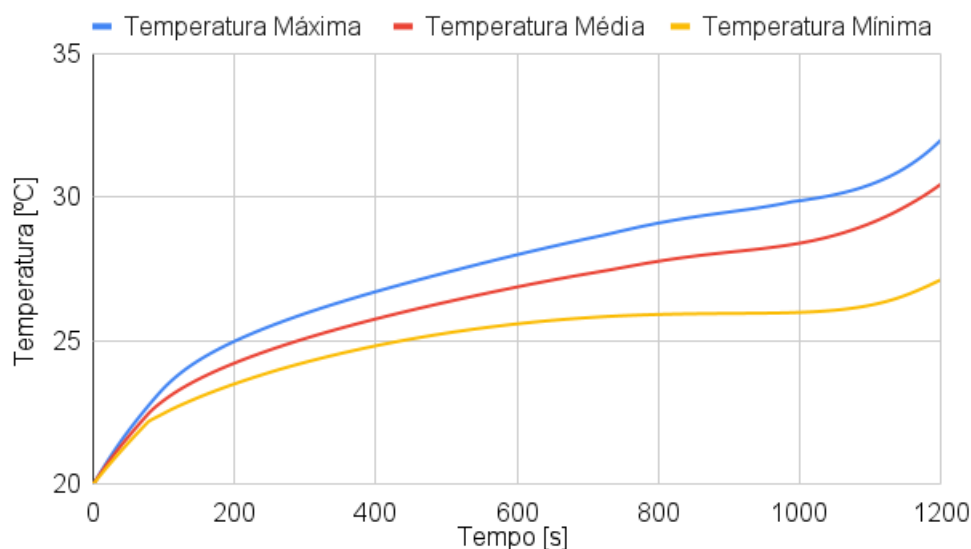


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Quanto às temperaturas da bateria no instante mais quente (fim da simulação), o máximo foi $32,0^{\circ}\text{C}$, enquanto a média foi de $30,4^{\circ}\text{C}$ e a mínima de $27,1^{\circ}\text{C}$. A sua evolução está na Figura 40, e está

aproximadamente $1,0^{\circ}\text{C}$ mais quente do que o caso com bateria na horizontal e $I = 6\text{ A}$.

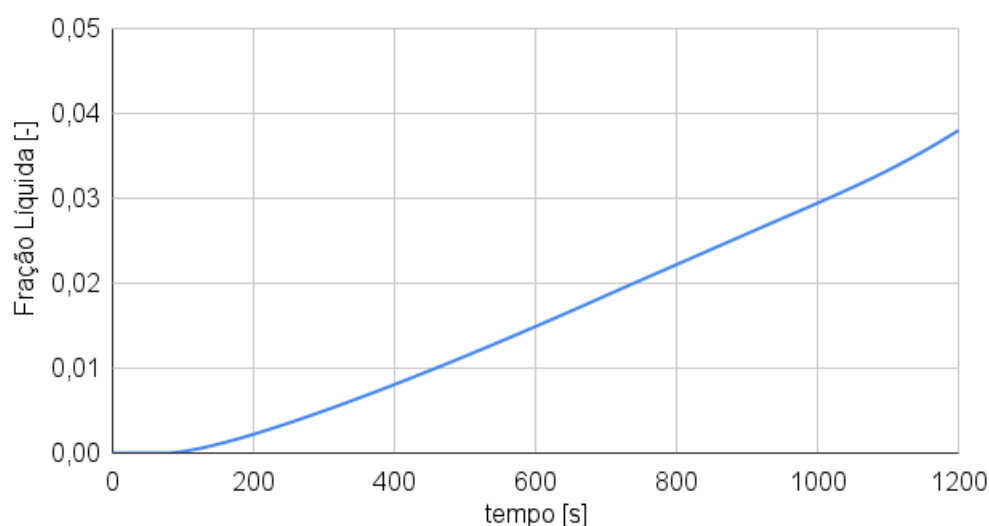
Figura 40 – Temperatura máxima, média e mínima na bateria vertical e $I = 6\text{ A}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No que diz respeito a fração líquida obtida para o PCM para a configuração com a bateria na posição vertical e corrente de 6 amperes, obteve-se também o maior valor de fração líquida no último instante de tempo, com valor de 0,038, que é praticamente idêntico ao caso na horizontal.

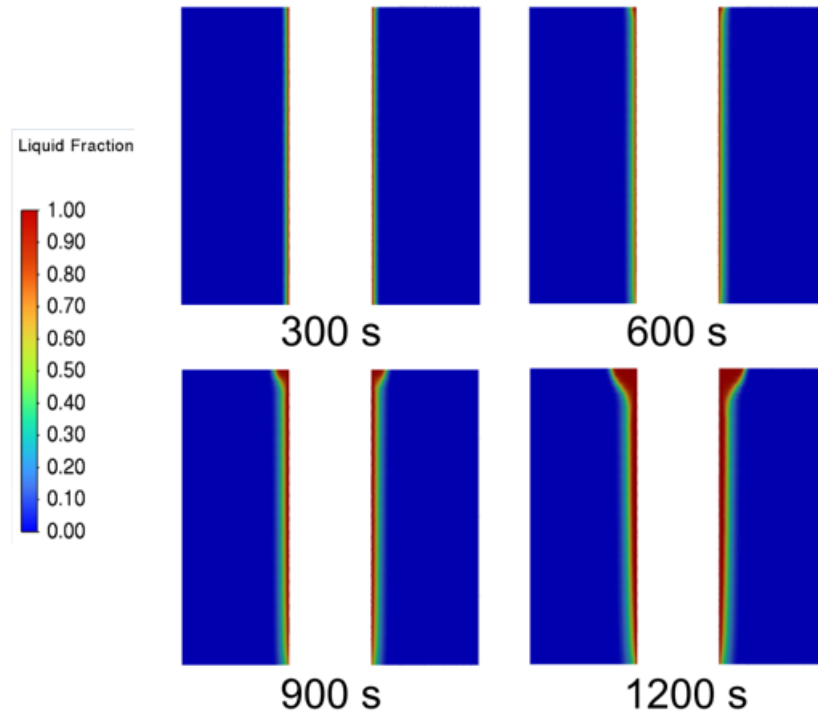
Figura 41 – Fração líquida no PCM, com bateria na vertical e $I = 6\text{ A}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Já a Figura 42 mostra o avanço da fração líquida a cada 300 s (25 % do tempo total). Nota-se o efeito da convecção natural, onde o líquido tende a subir, devido à convecção natural, concentrando o derretimento do material na região superior.

Figura 42 – Avanço do campo de fração líquida, com bateria na vertical e $I = 6$ A

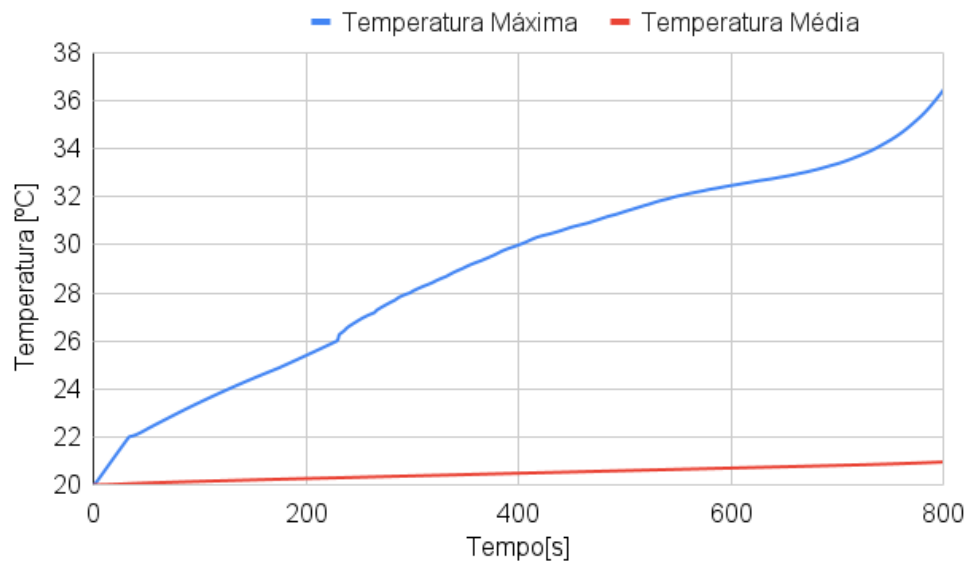


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3.2.2 Corrente elétrica de 9 A

Aqui observou-se que, para a configuração com a bateria na posição vertical e corrente de 9 amperes, a temperatura máxima do PCM foi atingida no último instante de tempo, com valor de $36,4^{\circ}\text{C}$, enquanto a temperatura média foi de $20,9^{\circ}\text{C}$ e também no último instante de tempo (Figura 43). Neste caso, a temperatura máxima é cerca de $3,0^{\circ}\text{C}$ superior ao caso na horizontal.

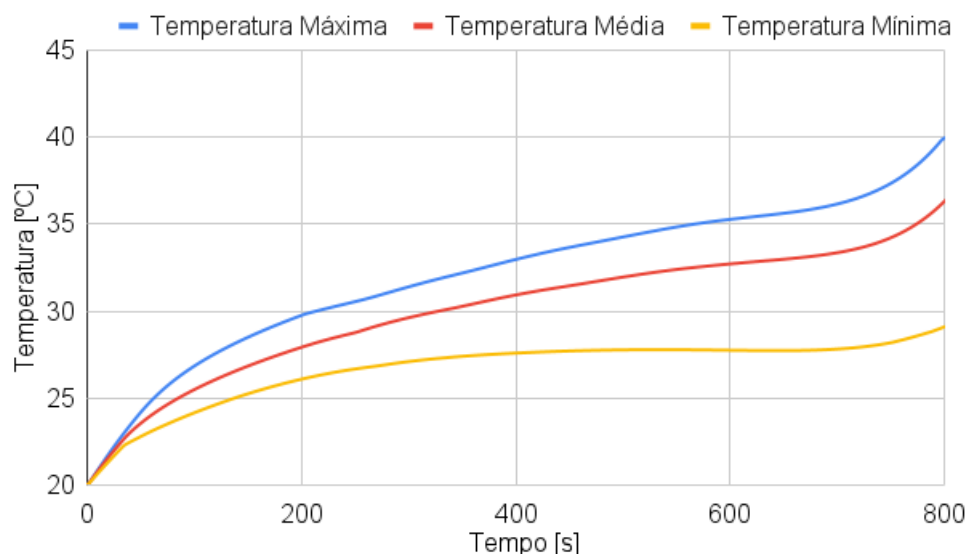
Figura 43 – Temperaturas média e máxima no PCM, com bateria na vertical e $I = 9$ A



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A temperatura máxima, média e mínima da bateria passou a ser de $39,9^{\circ}\text{C}$, $36,3^{\circ}\text{C}$ e $29,1^{\circ}\text{C}$, respectivamente, cerca de $2,0^{\circ}\text{C}$ mais quente que o caso equivalente na horizontal.

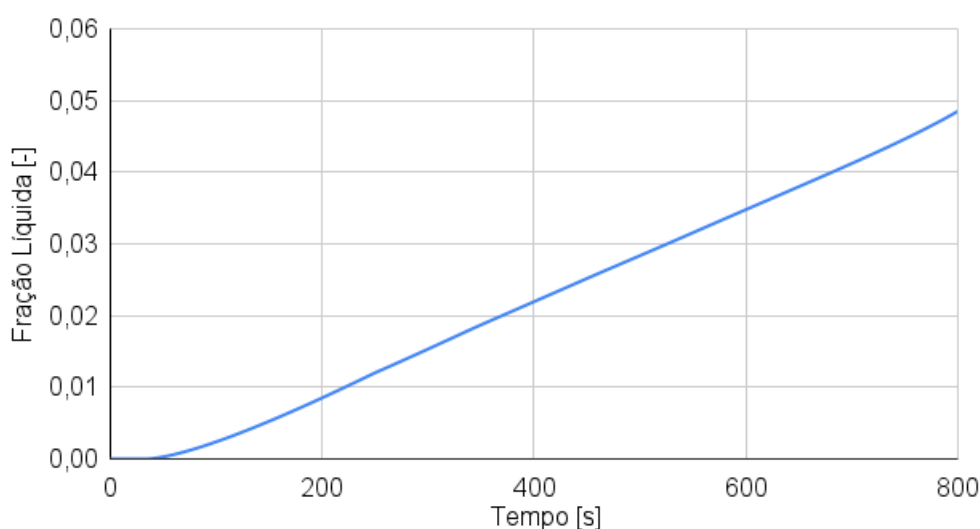
Figura 44 – Temperatura máxima, média e mínima na bateria vertical e $I = 9\text{ A}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No que diz respeito a fração líquida, o máximo valor é de 0,048, muito próximo ao visto na horizontal.

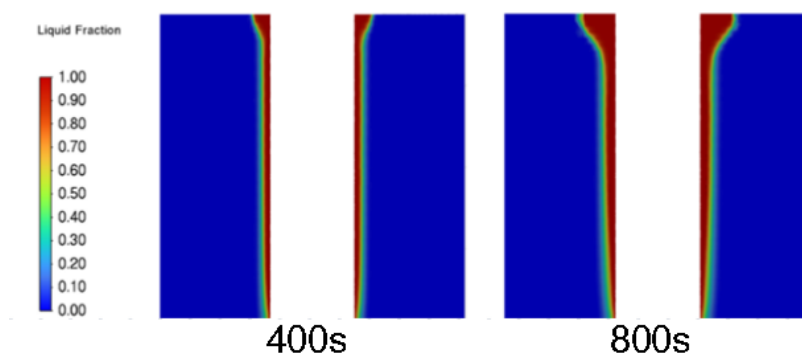
Figura 45 – Fração líquida no PCM, com bateria na vertical e $I = 9\text{ A}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para finalizar este caso, a Figura 46 mostra o avanço da fração líquida com um avanço de imagem de 50 % do tempo total. Novamente nota-se o efeito da convecção natural, onde o líquido tende a subir, resultando em uma região no topo concentrando a fração líquida.

Figura 46 – Avanço do campo de fração líquida, com bateria na vertical e $I = 9$

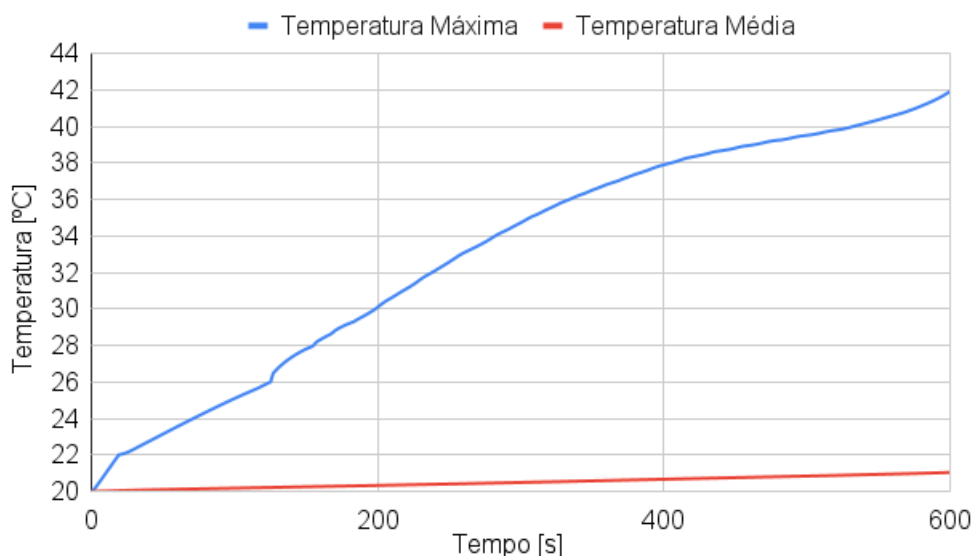


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3.2.3 Corrente elétrica de 12 A

Apresentando o último cenário testado na Figura 47, a temperatura máxima do PCM foi atingida no último instante de tempo, com valor de $41,9^{\circ}\text{C}$, enquanto a temperatura média foi de $21,0^{\circ}\text{C}$. Seguindo a tendência vista nos casos anteriores, este também resulta em um cenário mais quente, cerca de até $2,0^{\circ}\text{C}$ acima quando comparado ao caso na horizontal.

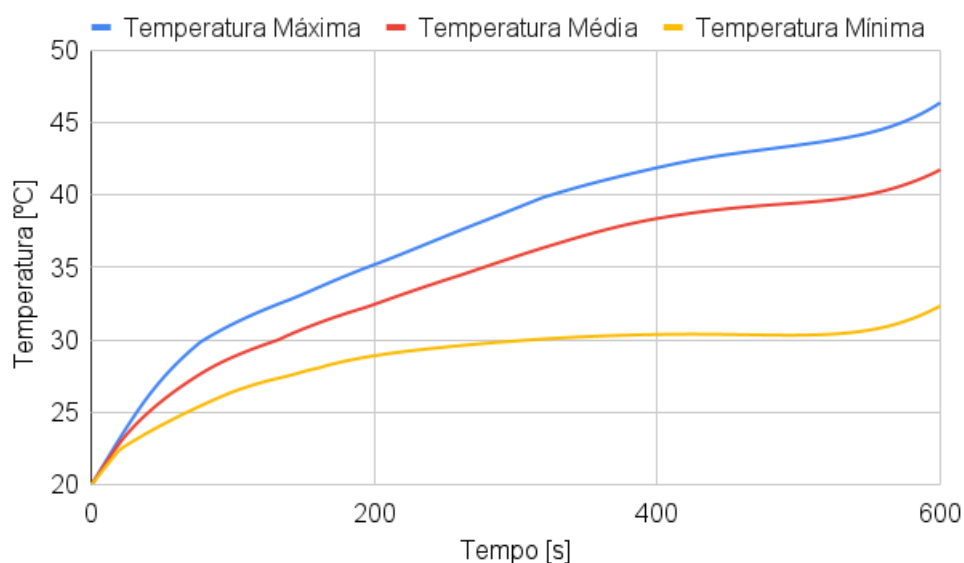
Figura 47 – Temperaturas média e máxima no PCM, com bateria na vertical e $I = 12\text{ A}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Voltando a atenção para a temperatura na bateria, os valores máximo, médio e mínimo foram de $46,4^{\circ}\text{C}$, $41,7^{\circ}\text{C}$ e $32,3^{\circ}\text{C}$, respectivamente, o que corresponde também a um cenário mais quente do que o horizontal.

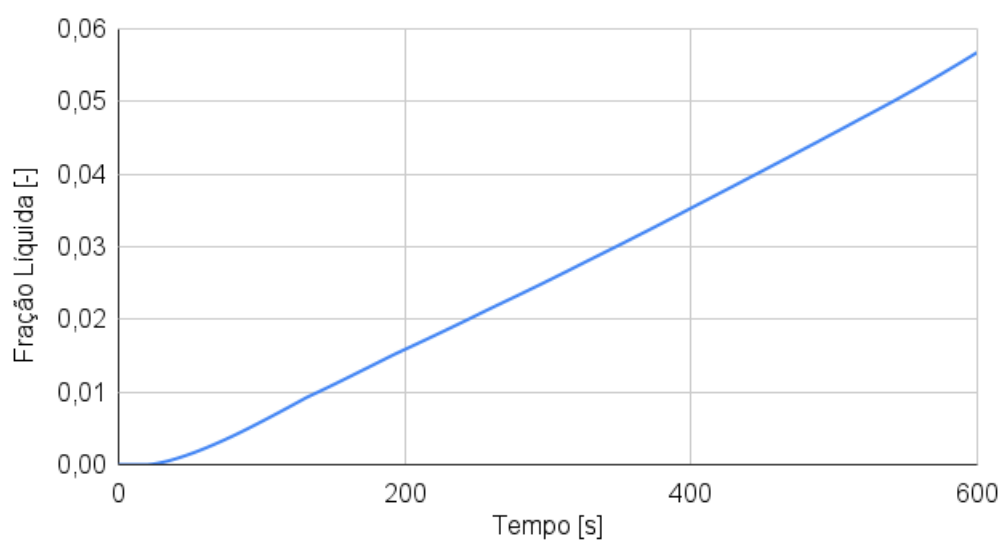
Figura 48 – Temperatura máxima, média e mínima na bateria vertical e $I = 12$ A



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No que diz respeito à fração líquida obtida para o PCM para a configuração com a bateria na posição vertical e corrente de 12 A, obteve-se 0,057, condição muito próxima à vista na orientação horizontal.

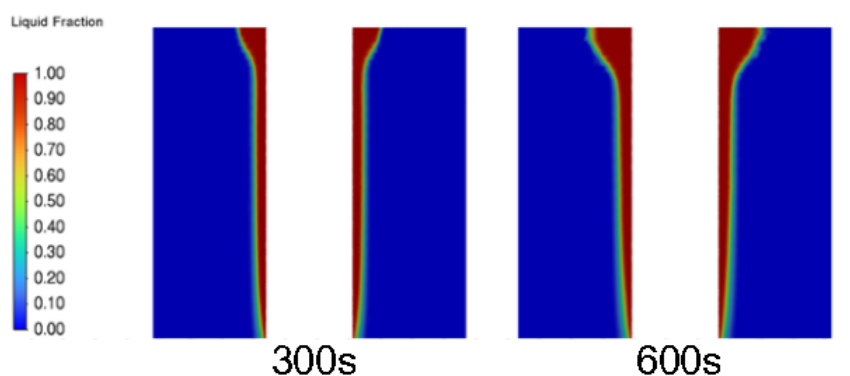
Figura 49 – Fração líquida no PCM, com bateria na vertical e $I = 12$ A



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Finalizando esta discussão, a Figura 50 mostra o avanço da fração líquida com um avanço de imagem de 50 % do tempo total e, como esperado, há uma concentração da fração líquida na parte superior, consequência da convecção natural.

Figura 50 – Avanço do campo de fração líquida, com bateria na vertical e $I = 12$



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

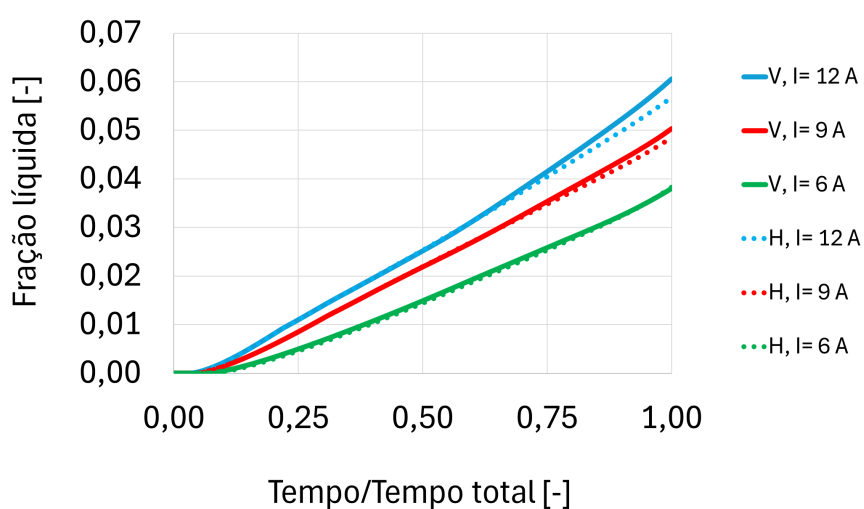
4.3.3 Horizontal versus vertical

A Figura 51 apresenta a fração líquida do PCM ao redor da bateria ao longo do tempo, para todos os casos. Como o tempo associado a cada caso é diferente, em virtude da corrente aplicada, o eixo da abscissa foi normalizado pelo tempo total de cada teste.

A influência da corrente elétrica é evidente: quanto maior a corrente, maior é a fração líquida alcançada ao final do processo. Para $I = 12$ A, por exemplo, as curvas atingem os maiores valores de fração líquida, enquanto para $I = 6$ A, os valores finais são os menores.

Em relação à orientação da bateria dentro do PCM, observa-se que a posição horizontal (H) resulta em uma fração líquida ligeiramente menor que a posição vertical (V), para a mesma corrente, embora seja muito próximo. Isso mostra que a configuração vertical pode estar favorecendo uma fusão mais intensa ou distribuída ao longo do tempo, devido à orientação do fluxo de calor e à convecção natural dentro do PCM.

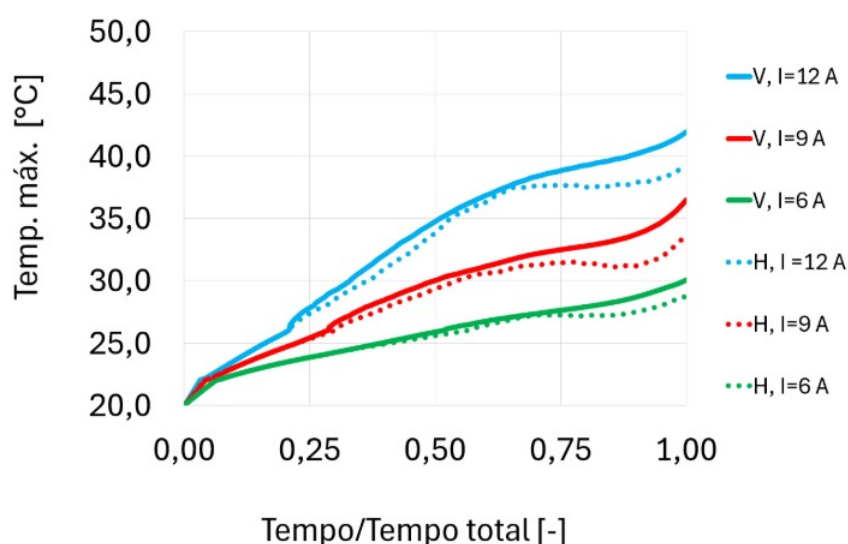
Figura 51 – Fração líquida do PCM para diferentes correntes e posições



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 52 mostra a evolução da temperatura máxima do PCM ao longo do tempo, para todos os casos avaliados. Observa-se que o posicionamento do PCM possui um comportamento interessante: para todas as correntes, a posição horizontal (H) tende a apresentar temperaturas máximas ligeiramente menores que a vertical (V). Esse resultado era esperado, uma vez que anteriormente já se mostrou que a fração líquida era menor nesta configuração.

Figura 52 – Temperaturas máximas do PCM obtidas para diferentes posições e correntes

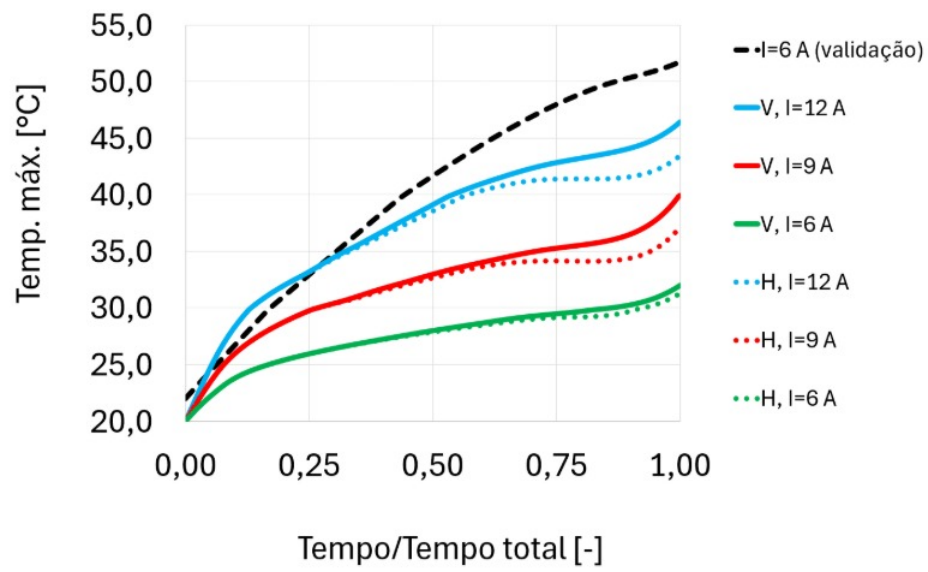


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por fim, a Figura 53 apresenta a evolução das temperaturas máximas da bateria para todos os casos. Além disso, também está incluído neste gráfico a curva de validação experimental, válido para o caso com $I = 6$ A sem PCM. Para todos os cenários, o aumento da corrente resulta em maiores temperaturas máximas, como esperado devido ao maior calor gerado pela bateria. Comparando as configurações com e sem o uso de PCM, nota-se que as configurações com PCM resultam em menores temperaturas ao longo do tempo, exceto numa região inicial sob $I = 12$ A, indicando a eficácia do material na dissipação térmica.

Além disso, ao comparar as posições horizontal (H) e vertical (V) do PCM, verifica-se que a posição horizontal é mais eficiente na contenção do aumento de temperatura da bateria. Por exemplo, para uma corrente de 12 A, a curva "H, $I = 12$ A" atinge temperatura máxima um pouco menor do que "V, $I = 12$ A". Esse comportamento se repete para as demais correntes, sugerindo que a disposição horizontal do PCM favorece uma melhor distribuição e absorção do calor gerado pela bateria.

Figura 53 – Temperaturas máximas da bateria obtidas para com e sem o uso de PCM em torno da bateria



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi estudado de forma numérica um modelo de resfriamento de bateria de íon-lítio baseado em um controle térmico passivo de PCM. Nas análises, o PCM tem o papel de conduzir e absorver o calor gerado pelo funcionamento da bateria. As simulações do presente trabalho foram implementadas no software Ansys Fluent, sendo o comportamento térmico do PCM, da bateria e a fração líquida do PCM avaliados sob diferentes posições da fonte geradora de calor (a bateria) e de corrente elétrica aplicada.

Por meio da análise dos resultados, observou-se que primeiramente a temperatura máxima da bateria é significativamente reduzida com a presença do PCM, sendo que essa redução é mais expressiva nas menores correntes elétricas e na configuração horizontal (H) do conjunto. As análises de fração líquida do PCM evidenciam que, à medida que a corrente aumenta, ocorre uma maior fusão do material, ou seja, há maior absorção de calor latente.

Foi observado também que o PCM na configuração horizontal (H) mantém o material em temperaturas mais baixas, o que é um indicativo de melhor distribuição e dissipação do calor. Ou seja, a orientação horizontal da bateria favorece um desempenho térmico mais equilibrado, contendo a elevação de temperatura do PCM e, conseqüentemente, da bateria.

Em resumo, o uso do PCM permite o funcionamento da bateria em correntes mais elevadas, mantendo-a dentro de faixas seguras de temperatura. Além disso, a configuração horizontal do PCM demonstrou maior eficácia no controle das temperaturas máximas, tanto do próprio material quanto da bateria, evidenciando-se como a opção mais eficiente para o gerenciamento térmico em condições de alta demanda térmica.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de dar continuidade a pesquisa sobre o tema, propõe-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolver outra geometria para o bloco de PCM, com mais atratividade (menos massa) e compatível com o mercado (mais barato), sem perder sua efetividade.
- Realizar estudos adicionais para explorar diferentes configurações e modelos de bateria;
- Efetuar simulações com outros materiais de mudança de fase, com propriedade térmica mais atrativas (temperatura de fusão, calor latente...);
- Efetuar simulações com mais de uma bateria (*pack*) integrada em PCM;
- Testas técnicas de aumento da condutividade térmica efetiva do PCM, como aletas e espumas metálicas, visando favorecer a transferência de calor por condução.

REFERÊNCIAS

- AANANDSUNDAR, A. *et al.* Investigation of liquid cooling for lithium-based batteries: A numerical analysis with nano enhanced phase change materials and metal foam, *In: ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICRO/NANOSCALE HEAT AND MASS TRANSFER*, 7, 2024 **proceedings** [...]. Nottingham: University of Nottingham, 2024. MNHMT2024-132693.
- ADHIKARI, N. *et al.* Thermal analysis of lithium-ion battery of electric vehicle using different cooling medium. **Applied Energy**, Oxford, England, v. 360, p. 122781, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122781>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- BERNARDI, D. *et al.* A general energy balance for battery systems. **Journal of The Electrochemical Society**, The Electrochemical Society, USA, v. 132, n. 1, p. 5, 1985. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1149/1.2113792>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- CHEN, Y. *et al.* A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. **Journal of Energy Chemistry**, China, v. 59, p. 83–99, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495620307075>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- COTTI, P. The discovery of the electric current. **Physica B: Condensed Matter**, Netherlands, v. 204, n. 1, p. 367–369, 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0921452694002898>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- DAHER, M. ALERTA DE SEGURANÇA - Baterias LiPo Explodem. **Blog DF Bolhas**, abr. 2016. Disponível em: <https://dfbolhas.blogspot.com/2016/04/alerta-de-seguranca.html>. Acesso em: 21 out. 2024.
- DEANGELIS, A. Bae systems and heart aerospace to collaborate on battery for electric airplane. **BAE Systems**, 2024. Disponível em: <https://www.baesystems.com/en-us/article/bae-systems-and-heart-aerospace-to-collaborate-on-battery-for-electric-airplane>. Acesso em: 21 out. 2024.
- EDISON, C. Aproximação de boussinesq. **Blog de Carlos Edison**, 31 dez. 2013. Disponível em: <https://carlosedison.blogspot.com/2013/12/aproximacao-de-boussinesq.html>. Acesso em: 22 out. 2024.
- FENG, F. *et al.* A combined state of charge estimation method for lithium-ion batteries used in a wide ambient temperature range. **Energies**, MDPI, Switzerland, v. 7, n. 5, p. 3004–3032, 2014. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/7/5/3004>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- HADDAD, Z. *et al.* Advancements and comprehensive overview of thermal management systems for lithium-ion batteries: Nanofluids and phase change materials approaches. **Journal of Power Sources**, Netherlands, v. 603, p. 234382, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775324003331>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- JOSHI, V.; RATHOD, M. K. Thermal transport augmentation in latent heat thermal energy storage system by partially filled metal foam: A novel configuration. **Journal of Energy Storage**, [S. l.], v. 22, p. 270–282, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X1830793X>. Acesso em: 15 nov. 2025.

- LAI, Y. *et al.* A compact and lightweight liquid-cooled thermal management solution for cylindrical lithium-ion power battery pack. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Elsevier, United of Kingdom, v. 144, p. 118581, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001793101836455X>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- LAN, C. *et al.* Thermal management for high power lithium-ion battery by minichannel aluminum tubes. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, United of Kingdom, v. 101, p. 284–292, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116302137>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- LEE, S.-K. *et al.* Investigation of the risk of thermal runaway in a pouch-type lithium-ion battery with an internal short based on a multiphysics simulation. **Applied Thermal Engineering**, Netherlands, v. 236, p. 121582, 2024. ISSN 1359-4311. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123016113>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- PICCOLINO, M. The bicentennial of the voltaic battery (1800–2000): the artificial electric organ. **Trends in Neurosciences**, United of Kingdom, v. 23, n. 4, p. 147–151, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166223699015441>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- ROCHA, L. Afinal, por que as baterias de lítio podem pegar fogo? **TecMundo**, 16 jun. 2015. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/produto/81577-baterias-litio-pegar-fogo.htm>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- SHAHID, A.; AGELIN-CHAAB, M. Experimental and parametric analysis of a novel hybrid thermal management strategy for cylindrical lithium-ion battery pack. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, Oxford, England, v. 218, p. 125153, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125153>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- SMART KITS. **Bateria de Lítio**. Fortaleza, 2024. Disponível em: <https://www.smartkits.com.br/bateria-cr18650-2600mah>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- VOLLER, V.; PRAKASH, C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, England, v. 30, n. 8, p. 1709, 1987. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0017931087903176>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- WAGH, V. A.; SAHA, S. K. Optimising extended fin design and heat transfer coefficient for improved heat transfer and pcm recover time in thermal management of batteries. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 255, p. 123964, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123964>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- XIN, S. *et al.* Thermal management scheme and optimization of cylindrical lithium-ion battery pack based on air cooling and liquid cooling. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 224, p. 120100–120109, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123001291>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- XU, X. M.; HE, R. Research on the heat dissipation performance of battery pack based on forced air cooling. **Journal of Power Sources**, Elsevier, United of Kingdom, v. 240, p. 33–41, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313003674>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- ZHANG, P. *et al.* Melting heat transfer characteristics of a composite phase change material fabricated by paraffin and metal foam. **Applied Energy**, [S. l.], v. 185, p. 1971–1983, jan 2017.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915013021>. Acesso em: 15 nov. 2025.

ZHANG, S. *et al.* Experimental study on heat transfer characteristics of metal foam/paraffin composite pcms in large cavities: Effects of material types and heating configurations. **Applied Energy**, [S. l.], v. 325, p. 119790, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922010686>. Acesso em: 15 nov. 2025.

ZHANG, X. *et al.* Distribution strategy of flexible phase change materials for pouch battery thermal management considering temperature non-uniformity. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 257, p. 124252, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431124019203>. Acesso em: 15 nov. 2025.