

ANÁLISE NUMÉRICO-COMPUTACIONAL DO RESFRIAMENTO EM CÉULAS POUCH DE ÍON-LÍTIO¹

Gabriel Aranha Requeijo – gar7711@hotmail.com

Sílvia Maria Stortini González Velázquez (Orientadora) – silviamaria.velazquez@mackenzie.br

RESUMO

Células de íon-lítio são preferência em veículos elétricos (EV) e dispositivos móveis devido à alta densidade de potência, menor custo e maior vida útil. Entretanto o calor gerado na bateria por efeito Joule, proporcional à taxa de carregamento (taxa C), expõe o sistema à redução de vida útil e do ciclo de vida. Para manter a temperatura da célula dentro do limite operacional, trocadores de calor devem ser utilizados. Neste artigo, é estudado o uso de um trocador de calor composto por placa com canais e fluido refrigerante (MCP). O conjunto célula e MCP é modelado e resolvido no software ANSYS CFX. A taxa de geração de calor volumétrica na célula é modelada em regime permanente, de acordo com a taxa C de carregamento. Na condição de 1C, com 11 kW/m³, a temperatura foi mantida em 30,87°C para a velocidade de 0,25mm/s a 25°C no fluido refrigerante. Para a taxa 3C, com 115 kW/m³, a temperatura máxima foi de 41,73°C, para a velocidade de 0,75mm/s a 25°C. A simulação do BTMS é demonstrada, com discussão de hipóteses simplificadoras e melhorias para o sistema de resfriamento, apontando positivamente para o MCP como trocador de calor em células de íon-Lítio. Palavras-chave: bateria íon-lítio; taxa C; BTMS; resfriamento bateria; MCP; ANSYS CFX.

NUMERICAL-COMPUTATIONAL ANALYSIS ON COOLING LITHIUM-ION POUCH CELLS

ABSTRACT

Lithium-ion battery cells are preferred in electric vehicles (EV) and mobile devices due to high power density, lower cost, and higher lifespan. However, heat generated by Joule effect in the battery, proportional to charging rate (C-rate), exposes the system to lifespan and life cycle reduction. To maintain cell temperature within operational limit, heat exchangers must be used. In this article, it is studied a heat exchanger compounded by a plate with channels and refrigerant fluid (MCP). Cell and MCP are modeled and solved on ANSYS CFX. Volumetric heat generation rate in the cell is modeled at steady-state, according to C-rate. At 1C condition, with 15 kW/m³, temperature was maintained at 30,87°C for inlet velocity 0,25mm/s at 25°C on refrigerant fluid. For 3C rate, with 115

¹ Artigo do Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Mecânica, EE, UPM, São Paulo, 2022.

kW/m³, maximum temperature was 41,73°C for inlet velocity 0,75mm/s at 25°C. BTMS simulation is demonstrated, discussing modelling assumptions and improves for the cooling system.

Keywords: lithium-ion battery; C-rate; BTMS; battery cooling; MCP; ANSYS CFX.

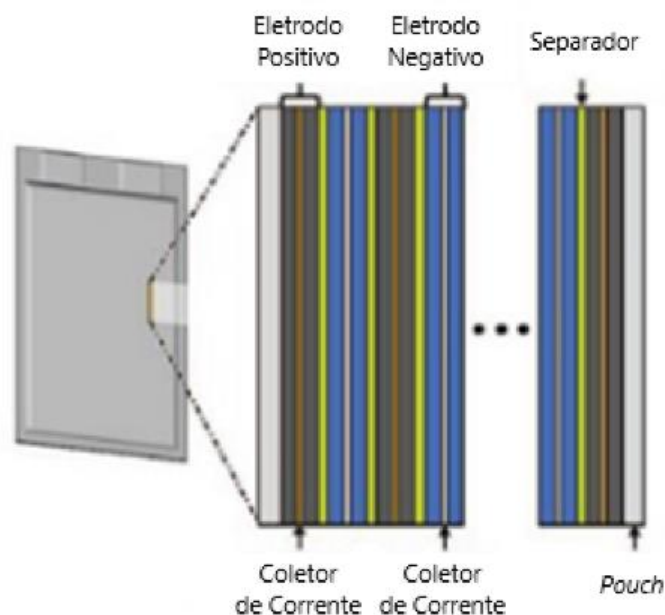
1 INTRODUÇÃO

Veículos elétricos (EV) são cada vez mais populares e tema de discussões acadêmica e governamentais. Estimulado o desenvolvimento dessa tecnologia, EVs podem constituir diferentes configurações, dentre elas elétricos híbridos (HEV), elétricos híbridos-plugáveis (PHEV), ou elétricos movidos à bateria (BEV) (SAMBA et al., 2014).

Baterias para BEVs podem apresentar diferentes composições como íon-Lítio, metal-Níquel híbrida, chumbo-ácido, sendo a mais abrangente a de íon-Lítio (DOE, 2021). A motivação pela preferência da tecnologia de íon-Lítio se justifica pelo aumento de densidade de potência e energia, maior ciclo de vida e vida útil, menor custo e maior confiabilidade (BARCELLONA; PIEGARI, 2021).

Dentre os principais modelos de bateria de íon-Lítio, o modelo *pouch* (bolsa, em inglês) tem sido cada vez mais utilizado em sistemas de armazenamento de energias renováveis, EVs e dispositivos móveis (BARCELLONA; PIEGARI, 2021). Algumas de suas vantagens são a alta densidade de energia e longa vida útil (GRECO et al., 2014). Uma bateria *pouch* de íon-Lítio é ilustrada na Figura 1.

Figura 1 – Esquema de uma célula de bateria pouch de íon Lítio



Fonte: adaptado de KOK; ALKAYA, 2020.

A Figura 1 apresenta um esquema da célula de bateria pouch, que configura a montagem de seus componentes empilhados para constituir o conjunto da célula de bateria. A energia é concentrada

nos coletores de corrente e conduzida pelos eletrodos positivo e negativo, divididos fisicamente pelo separador e limitados externamente pela *pouch* que dá o nome dessa configuração (KOK; ALKAYA, 2020).

Entretanto, células de bateria apresentam um aumento na temperatura associado à geração de corrente elétrica (BENAVIDES et al., 2020). O resultado desse aquecimento, quando além dos limites operacionais da bateria, pode comprometer parcial ou integralmente sua funcionalidade, causar incêndio espontâneo do componente ou até pequenas explosões (PATIL; SEO; LEE, 2021). Para evitar o aquecimento irrestrito, é necessário um sistema de controle térmico da bateria (BTMS, sigla em inglês para *battery thermal management system*), que garanta a operação dentro dos limites de temperatura determinados para cada configuração (ZHANG et al., 2020).

Dado que a energia é gerada em cada célula, é preciso propor soluções que lidem com o calor nesta unidade, a fim de evitar variações de temperatura entre células e garantir a eficiência no resfriamento (PATIL; SEO; LEE, 2021). Para assegurar a performance, segurança e vida útil de baterias de íon-Lítio, sua temperatura deve ser mantida idealmente entre 25 e 40°C, enquanto a variação de temperatura entre células não deve exceder 5°C (PATIL; SEO; LEE, 2021).

Um grande desafio para os BEVs se refere ao carregamento rápido da bateria. A fim de proporcionar maior autonomia aos veículos e conforto aos usuários em relação ao tempo de carregamento, o carregamento rápido se torna essencial para o mercado de EVs (TOMASZEWSKA et al., 2019). Em termos práticos, o carregamento rápido está associado ao crescimento da taxa C, que mede em que proporção de tempo a bateria é carregada ou descarregada, de acordo com sua máxima capacidade (AMALESH; NARASIMHAN, 2020).

Como exemplo, o modelo Porsche Taycan, com uma bateria de 93,4 kW.h, a uma taxa de 1C, seria recarregado em uma hora. Tal modelo, entretanto, pode receber uma potência média de 187 kW, o dobro da capacidade da bateria, configurando uma taxa de 2C para recarga, viabilizando uma carga completa em até 30 minutos (PORSCHÉ, 2019). Contudo, quanto maior a taxa C, maior o calor dissipado pela bateria, demandando maior eficiência no BTMS para evitar o comprometimento da segurança e vida útil da bateria (WEISS et al., 2021).

Mediante a importância de estudar o comportamento térmico de BTMSs, são propostas soluções utilizando simulações numérico-computacionais, face à necessidade de dimensionamento de componentes de resfriamento com múltiplos dados de entrada e geometrias complexas (PATIL; SEO; LEE, 2021).

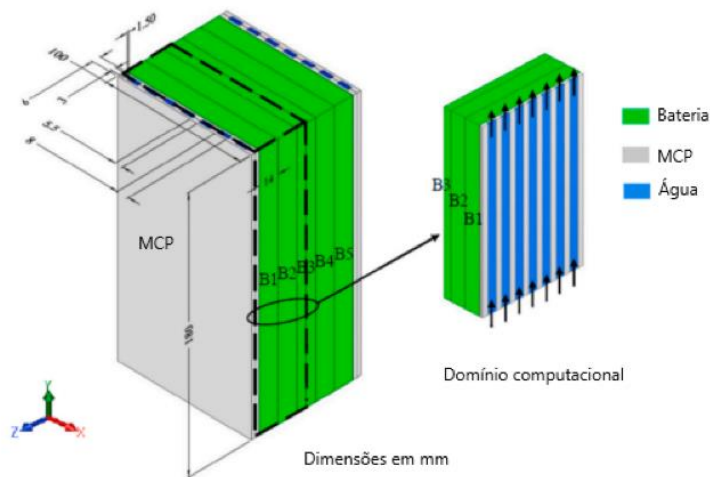
2 REVISÃO DA LITERATURA

O modelamento de células de íon-Lítio pode ser abordado de acordo com o trabalho de Bernardi, Pawlikowski e Newman (1985), que aplica a primeira lei da termodinâmica para resolver o balanço de energia na célula. Os trabalhos de Samba *et al.* (2014) e Xie *et al.* (2020) exemplificam a eficiência no uso dessa abordagem baseada na resistência elétrica da célula para estimar a geração de calor no componente.

Patil *et al.* (2021), exemplificam o aquecimento acima da temperatura limite, com valores próximos de 40°C registrados no polo positivo de uma bateria de 20 Ah com taxa de 1C. Taxas 2C e 3C, por sua vez, registraram temperaturas próximas de 50°C e 60°C, respectivamente.

O estudo de Amalesh e Narasimhan (2020) avalia diferentes geometrias dos canais para a mesma vazão. A Figura 2 ilustra o modelo base do estudo, com canais retangulares retos.

Figura 2 – Modelo de MCP com canais retangulares retos



Fonte: adaptado de AMALESH; NARASIMHAN (2020).

A Figura 2 mostra o domínio computacional de um MCP, abreviação de *mini-channel cold plate*, inglês para um trocador de calor composto por placa refrigerada com mini canais de fluido refrigerante, no trabalho de Amalesh e Narasimhan (2020). O MCP com canais retangulares retos, ilustrado na figura 4, registrou variação de temperatura de 26°C para um conjunto de 5 baterias de 45 Ah com um par de MCP na extremidade.

Panchal *et al.* (2017), também propõem o resfriamento por MCP, estudando a influência da vazão do fluido refrigerante e sua temperatura na entrada. Zhang *et al.* (2017) também apresentam abordagens para o estudo de resfriamento com MCP.

Novas propostas de BTMSs podem ser encontradas no trabalho de Patil, Seo e Lee (2021), que introduzem o resfriamento baseado em fluido dielétrico, estudando a influência da condição estacionária ou regime permanente do fluido na transferência de calor com a bateria. Para uma célula de 20Ah, com taxa de 3C, a temperatura máxima obtida foi de 58,2°C quando resfriada por convecção

natural. Com o fluido dielétrico estático, a temperatura máxima foi de 43,6°C, enquanto o modelo com fluido dielétrico estacionário reduziu a temperatura máxima a 34,8°C.

3 METODOLOGIA

As simulações foram conduzidas no software ANSYS CFX®, que utiliza o método dos volumes finitos para resolução das equações governantes. O modelo numérico computacional foi executado em três etapas: pré-processamento; processamento; e pós-processamento.

No pré-processamento, foi feita a criação do domínio computacional, discretização do modelo e a definição das condições de contorno. O processamento consiste na resolução das equações governantes por meio do método numérico-computacional. No pós-processamento foi aferida a discretização espacial e realizada a extração de dados para interpretação e análise dos resultados obtidos para o modelo proposto.

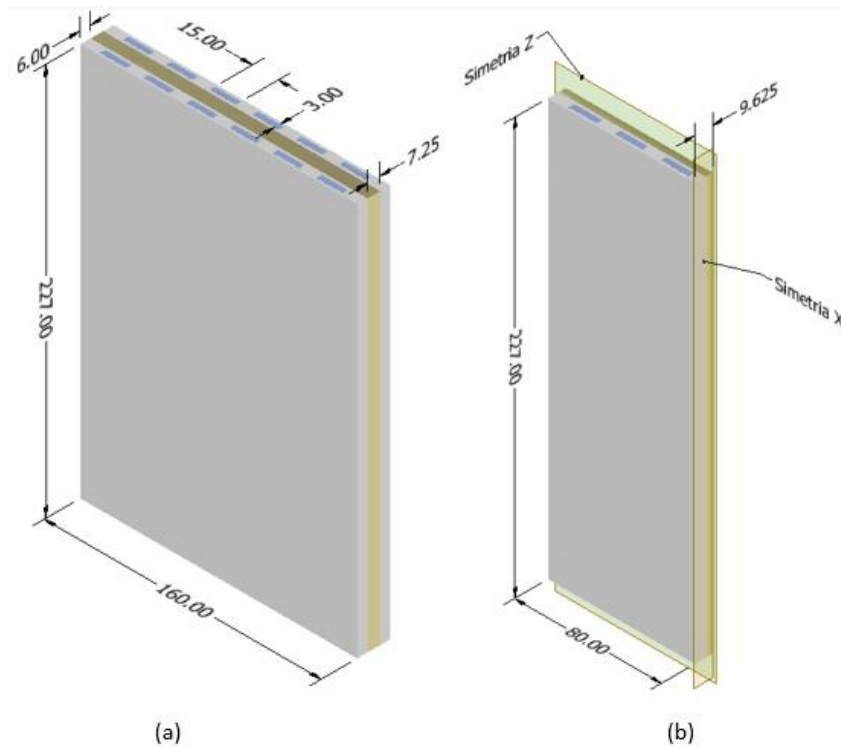
Foram criados três domínios: um para célula, para resolução da variação de temperatura por meio do modelo térmico baseado na resistência elétrica; um para resolução da variação de temperatura do MCP; e um para resolução do escoamento e variação da temperatura da água.

A sequência de simulações verificou a variação de temperatura da célula com a interferência do MCP em regime permanente. A interação entre os três componentes, célula, MCP e água, possibilitou a análise do resfriamento na bateria. As variáveis de entrada foram a corrente elétrica, para a célula, e a velocidade do fluido refrigerante, para a água.

3.1 DOMINIO COMPUTACIONAL

A Figura 3, a seguir, ilustra o domínio computacional do modelo proposto.

Figura 3 – Conjunto BTMS e domínio computacional



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

A Figura 3a ilustra o modelo de célula, ao centro em dourado, com um MCP em cada extremidade, em cinza, e canais com água representados pela cor azul. A Figura 3b ilustra o domínio computacional, utilizando simetrias nos eixos X (largura) e Z (espessura), reduzindo a geometria modelada em 75%. As dimensões da célula seguem como o indicado em Millet *et al.* (2017) e Patil, Seo e Lee (2021) no estudo de células *pouch* com capacidade de 20A.h.

3.2 MODELAMENTO DA CÉLULA

O domínio da célula contou com um subdomínio para taxa de geração de calor volumétrica, representando o aquecimento da célula por efeito Joule. As hipóteses simplificadoras consideradas foram: propriedades da bateria isotrópicas; polos da célula desprezados; calor gerado homogeneamente na célula, em regime permanente; e calor não afeta as propriedades eletroquímicas (e vice-versa).

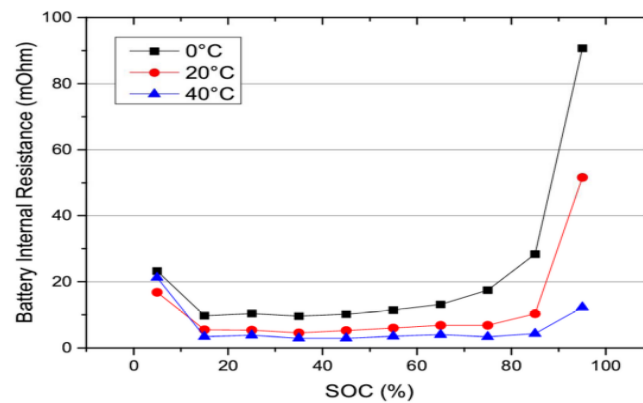
O modelo de geração de calor proposto foi baseado no trabalho de Bernardi, Pawlikowski e Newman (1985). A Equação 1 a seguir, apresenta a formulação para o calor gerado na célula:

$$q_{gen} = \frac{[RI^2 + (T \frac{dE}{dT})I]}{V_{bat}} \quad (1)$$

Em que q_{gen} é o calor gerado na célula, em W/m^3 , R é a resistência em Ohm, I é a corrente em A, T é a temperatura em K e V_{bat} o volume da bateria, em m^3 . Já o fator derivativo, $\frac{dE}{dT}$, faz conta ao coeficiente de entropia de acordo com a temperatura, em V/K .

Para determinar o calor gerado no modelo proposto foram necessários dados experimentais da resistência elétrica da célula e do coeficiente de entropia. O trabalho de Millet *et al.* (2017) apresenta uma medição calorimétrica das propriedades de uma bateria *pouch* de 20A.h, a seguir, no Gráfico 1.

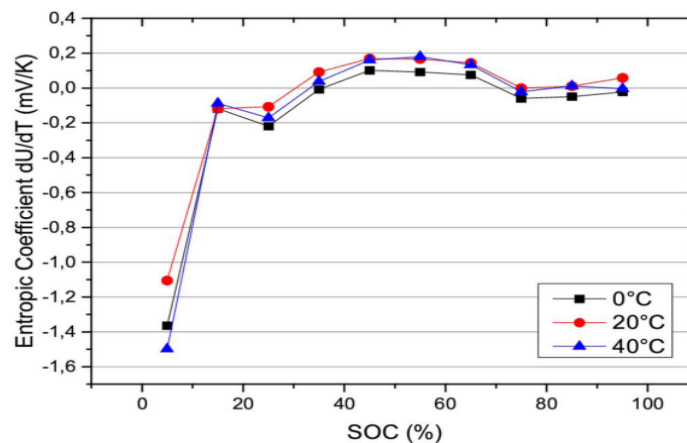
Gráfico 1 – Resistência interna x SOC



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

De acordo com o Gráfico 1, a resistência interna da bateria varia de acordo com o SOC (do inglês *state of charge*, estado de carga em português) que apresenta a porcentagem da carga total na célula. Entretanto, a variação acontece de maneira significativa apenas antes dos 15% e após os 85% de carga. Simplificando a abordagem, a resistência interna foi considerada constante de valor 8 mOhm. Em sequência, o Gráfico 2 apresenta o coeficiente de entropia da célula de 20Ah.

Gráfico 2 – Coeficiente de entropia x SOC



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

O Gráfico 2 apresenta a variação do coeficiente de entropia de acordo com o SOC. Seguindo o mesmo princípio justificado no gráfico 1, o coeficiente de entropia foi considerado constante e de valor 0,1 mV/K. A célula de bateria foi modelada de acordo com a Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Parâmetros da célula *pouch* de íon-lítio

Parâmetro	Valor	Unidade
Dimensões gerais	(160x227x13)	mm
Capacidade	20	A.h
Energia Nominal	65	W.h
Energia Total (Referência)	93400	W.h
Calor específico	1000	J/kg.K
Condutividade térmica	18.2	W/m.K
Resistencia interna	$0,8 \times 10^{-3}$	Ohm (Ω)
Coeficiente de Entropia	$0,1 \times 10^{-3}$	V/K

Fonte: Patil *et al.* (2021)

O número de células, n_{cel} , necessárias para uma bateria modelo pode ser determinado pelo quociente da energia nominal pela energia total, apresentado na Equação 2.

$$n_{cel} = \frac{Energia_{total}}{Energia_{nominal\ da\ célula}} \quad (2)$$

3.3 MODELAMENTO DO MCP

O MCP é composto de canais retangulares retos. A hipótese simplificadora utilizada para o MCP foi: o MCP troca calor apenas com a célula de bateria e o fluido.

O MCP foi resolvido pelo equacionamento de energia, de acordo com a Equação 3.

$$\rho_{mcp} c_{mcp} \frac{\partial T_{mcp}}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{mcp} \nabla T) \quad (3)$$

Em que ρ_{mcp} é a densidade do MCP, c_{mcp} é o calor específico do MCP e k_{mcp} é a condutividade térmica do MCP (AMALESH; NARASIMHAN, 2020). A seguir, a Tabela 2 apresenta as propriedades do MCP.

Tabela 2 – Parâmetros para o MCP

Parâmetro	Valor	Unidade
Modelo	Retangular reto	-
Dimensões gerais	(160x227x6)	mm
Dimensões dos canais	(15x3x227)	mm
Material	Alumínio	-
Densidade	2719	kg/m ³
Calor específico	871	J/kg.K
Condutividade térmica	202,4	W/m.K

Fonte: Amalesh e Narasimhan (2020).

3.4 MODELAMENTO DO FLUIDO (ÁGUA)

As hipóteses simplificadoras para o fluido foram: fluido incompressível (densidade constante); regime permanente; condição de não escorregamento nas paredes; e saída em jato livre ($P_{saída} = P_{atmosférica}$).

O fluido refrigerante, água, foi resolvido pelo equacionamento de energia, na Equação 4.

$$\rho_{água} c_{água} \frac{\partial T_{água}}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{água} \nabla T) \quad (4)$$

Em que $\rho_{água}$ é a densidade do MCP, $c_{água}$ é o calor específico da água e $k_{água}$ é a condutividade térmica da água. Quanto à condição do escoamento da água, calculou-se o número de Reynolds, por meio da Equação 5.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (5)$$

Em que D é o diâmetro da tubulação e μ é a viscosidade dinâmica do fluido. Utilizando um canal retangular, o diâmetro hidráulico equivalente ($D = D_h$) foi calculado para o número de Reynolds, por meio da Equação 6.

$$D_h = \frac{4 \cdot \text{Área da Secção Transversal}}{\text{Perímetro Molhado}} = \frac{2ab}{a + b} \quad (6)$$

Considerando analisar a potência total necessária para movimentar o fluido dentro do MCP, aplicou-se a Equação 7.

$$N_f = 4 Q \Delta p n_{cel} \quad (7)$$

Em que N_f é a potência necessária no fluido em W, Q é a vazão volumétrica do fluido, em m^3/s , Δp é a diferença de pressão no fluido, em Pa, e n_{cel} representa a quantidade de células em uma bateria, calculada na Equação 2. O adimensional “4” é o fator que leva em consideração a simetria nos eixos X e Z do modelo. Como a pressão na saída será considerada zero, pode-se utilizar $\Delta p = p_{in}$, em que p_{in} é a pressão na entrada do canal.

A Tabela 3, a seguir, apresenta as condições para o fluido refrigerante (água).

Tabela 3 – Propriedades e condições do fluido refrigerante (água)

Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura de entrada	25	°C
Velocidade de entrada	0,25; 0,5; 0,75	mm/s
Viscosidade Dinâmica	$0,893 \cdot 10^{-3}$	m/s^2
Calor específico	4179	J/kg.K
Condutividade térmica	0,613	W/m.K
Pressão na saída	0	Pa

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

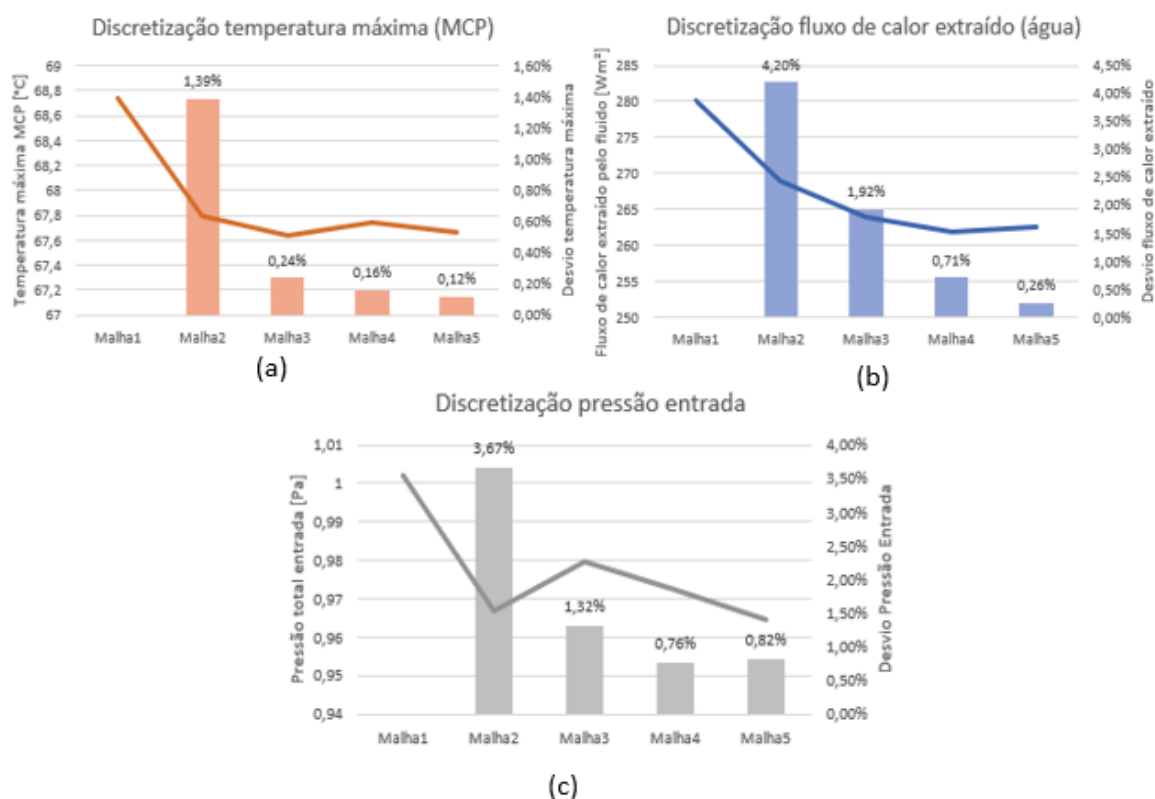
3.5 DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL

Após o modelamento das geometrias no software, a discretização da malha garante a acurácia da malha por meio do teste de independência da malha. Deve ser aferida a menor quantidade de elementos possíveis até o desvio mínimo entre resultados, determinando a malha suficiente para o processamento adequado das equações governantes.

Célula e MCP foram modelados com elementos de tamanho máximo de 0,8 mm, enquanto a água foi estudada a partir de elementos com tamanho máximo de 0,8 mm e variação do número de camadas no *inflation* (modelamento utilizado em fluidos para captar o comportamento da camada limite), a partir de duas, com espessura total de 0,6 mm. O resíduo máximo foi de $1 \cdot 10^{-5}$.

As grandezas analisadas na validação da malha foram: temperatura máxima (fluido refrigerante); pressão total (entrada do fluido refrigerante); e o fluxo de calor extraído pelo fluido. O Gráfico 3, a seguir, apresenta a discretização nos canais de acordo com o número de elementos.

Gráfico 3 – Resultados da discretização da malha



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

A tolerância para o desvio nos resultados da discretização é particular de cada aplicação. Para este estudo, entende-se como suficiente um desvio menor que 1% para as duas malhas consecutivas, onde a coluna apresenta o desvio em relação à malha anterior. De acordo com o Gráfico 3a, a malha 2 seria suficiente, pois a malha 3 teve desvio de 0,24% e então a malha 4, um desvio de 0,16%, estáveis abaixo de 1%. Contudo, o Gráfico 3b indica a necessidade da malha 3, com desvio de 0,39%, seguido de 0,24%. O Gráfico 3c também aponta para o uso da malha 3 que, com 2258246 elementos, apresenta resultados estáveis com o menor uso de poder computacional para resolução. Sendo assim, a malha 3 foi determinada como a malha para a sequência do estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aquecimento da bateria por efeito Joule foi simulado por meio de um subdomínio com geração de calor homogênea, de acordo com a taxa C, com valores calculados utilizando a equação 1. A Tabela 4, a seguir, apresenta a equivalência entre taxa C, corrente e taxa de geração de calor.

Tabela 4 – Equivalência taxa C e taxa de geração de calor

Taxa C	Corrente (A)	Taxa de Geração de Calor (kW/m ³)
1C	20 A	15

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Mediante o aumento na geração de calor, foram propostas três vazões de entrada para a água, com valores de 0,25mm, 0,5 mm/s e 0,75 mm/s, e o cálculo do número de Reynolds (equação 5) determina a condição de escoamento do fluido.

As medidas do canal são convertidas na equação 6, determinando o diâmetro hidráulico do canal de $0,5 \cdot 10^{-3} m$. O resultado da equação 5 determina a condição de escoamento da água. Quando o número de Reynolds (Re) for abaixo de 2000, considera-se o escoamento laminar, transitório quando entre 2000 e 4000, ou turbulento quando acima de 4000 (AMALESH; NARASIMHAN, 2020).

A Tabela 5, a seguir, apresenta o resultado para as vazões propostas.

Tabela 5 – Classificação do escoamento nos canais do MCP

Simbologia	Velocidade	Pressão entrada Total	Potência fluido Total	Número de Reynolds	Condição do Escoamento
	Vin [m/s]	Pin [Pa]	Nf [W]		
V1	$0,75 \times 10^{-3}$	0,96	$0,16 \times 10^{-3}$	1,78	Laminar
V2	$1,5 \times 10^{-3}$	1,94	$0,62 \times 10^{-3}$	3,56	Laminar
V3	$3,0 \times 10^{-3}$	2,92	$1,42 \times 10^{-3}$	5,34	Laminar

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

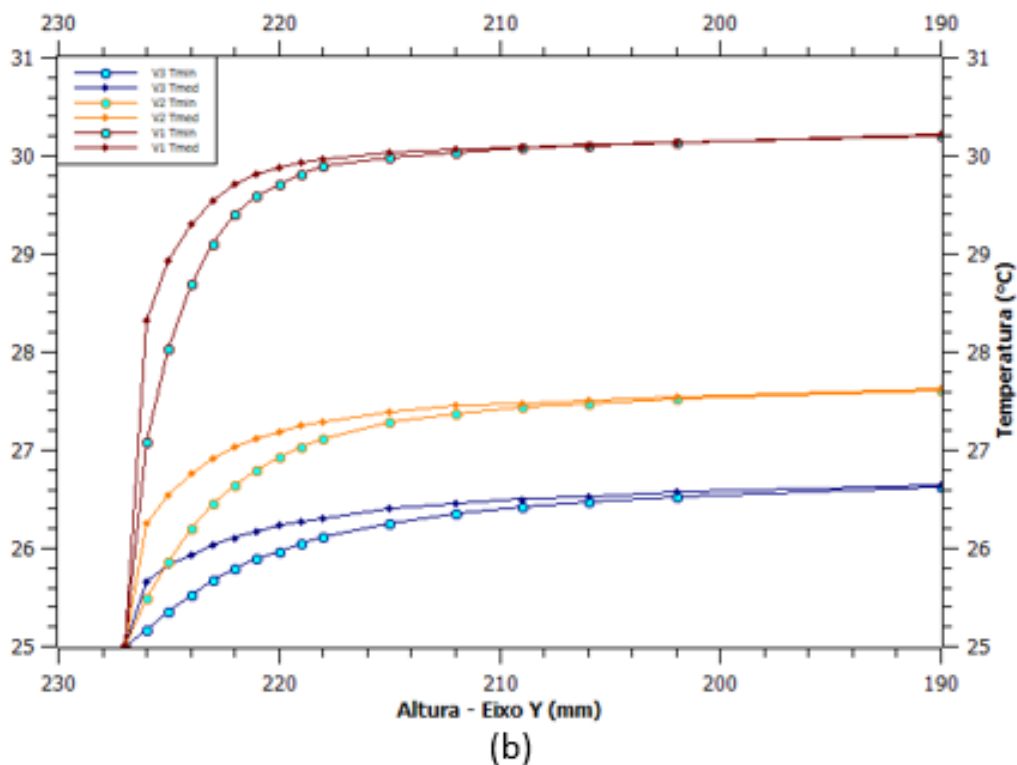
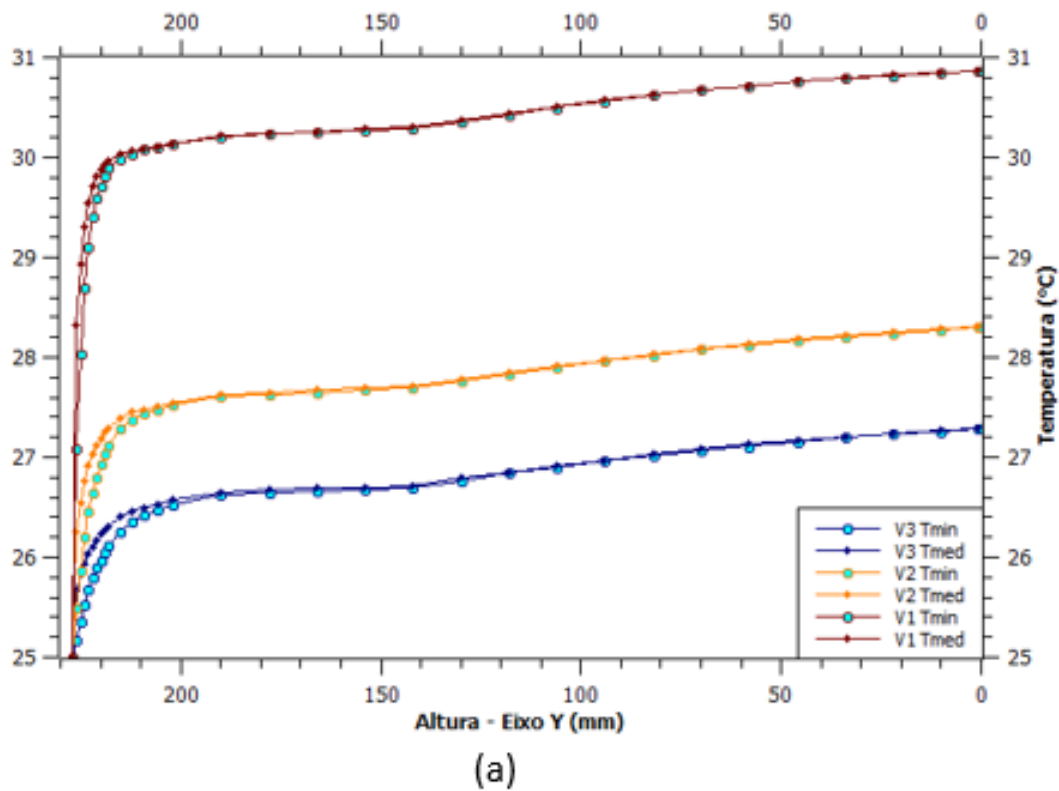
A Tabela 5 também introduziu a pressão de entrada, dependente das condições termodinâmicas do fluido e o cálculo da potência necessária no fluido N_f , de acordo com a Equação 7, para cada velocidade de entrada.

O objetivo foi garantir uma temperatura na célula entre 25°C e 40°C, limite operacional descrito na literatura (PATIL; SEO; LEE, 2021). Para as taxas 1C e 3C, foram simuladas e analisadas a mínima dentre as vazões propostas que mantenha a temperatura do conjunto abaixo de 40°C.

3.1 TAXA 1C (11 kW/m³)

A taxa 1C equivale ao carregamento completo da bateria em 1 hora. O Gráfico 4 ilustra a temperatura média e máxima da água em 32 planos ao longo do eixo Y.

Gráfico 4 – Temperatura média e mínima (água) x Eixo Y (altura)



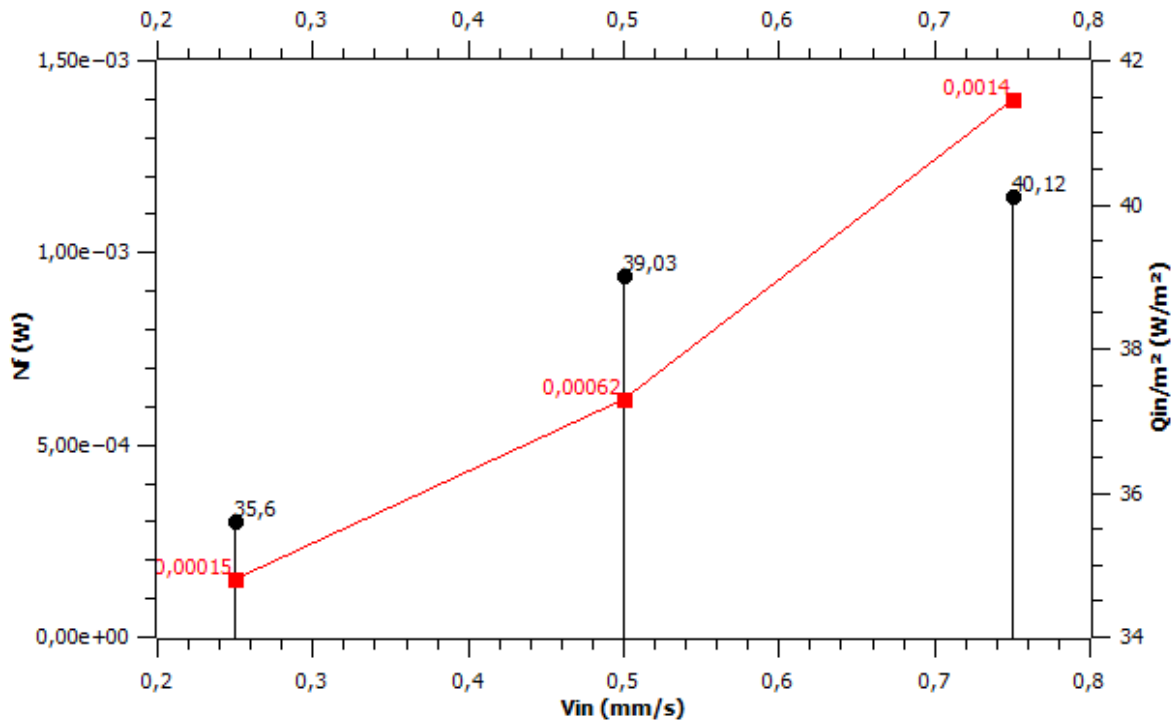
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

O Gráfico 4a ilustra, em acordo com o limite operacional, que a velocidade V1 manteve a temperatura do conjunto (célula, MCP e fluido) em até 30,87°C. As velocidades V2 e V3, comparativamente à V1, apresentaram uma redução na temperatura máxima de 2,57°C e 3,58°C com temperaturas de 28,30°C e 27,29°C, respectivamente. O Gráfico 4b também permite analisar o ponto

em que a temperatura mínima na água se torna a temperatura média (diferença de temperaturas menor que 0,05°C), a partir da altura Y de 215 mm para V1, 12 mm após a entrada do fluido. O ponto de convergência da temperatura mínima e temperatura média se afasta da entrada do fluido com o aumento da velocidade de entrada.

O Gráfico 5, a seguir, apresenta a potência necessária no fluido N_f e o fluxo calor recebido pelo fluido Q_{in} , de acordo com as três diferentes velocidades de entrada V_{in} .

Gráfico 5 – Fluxo calor recebido pelo fluido, eficiência simples e velocidade de entrada

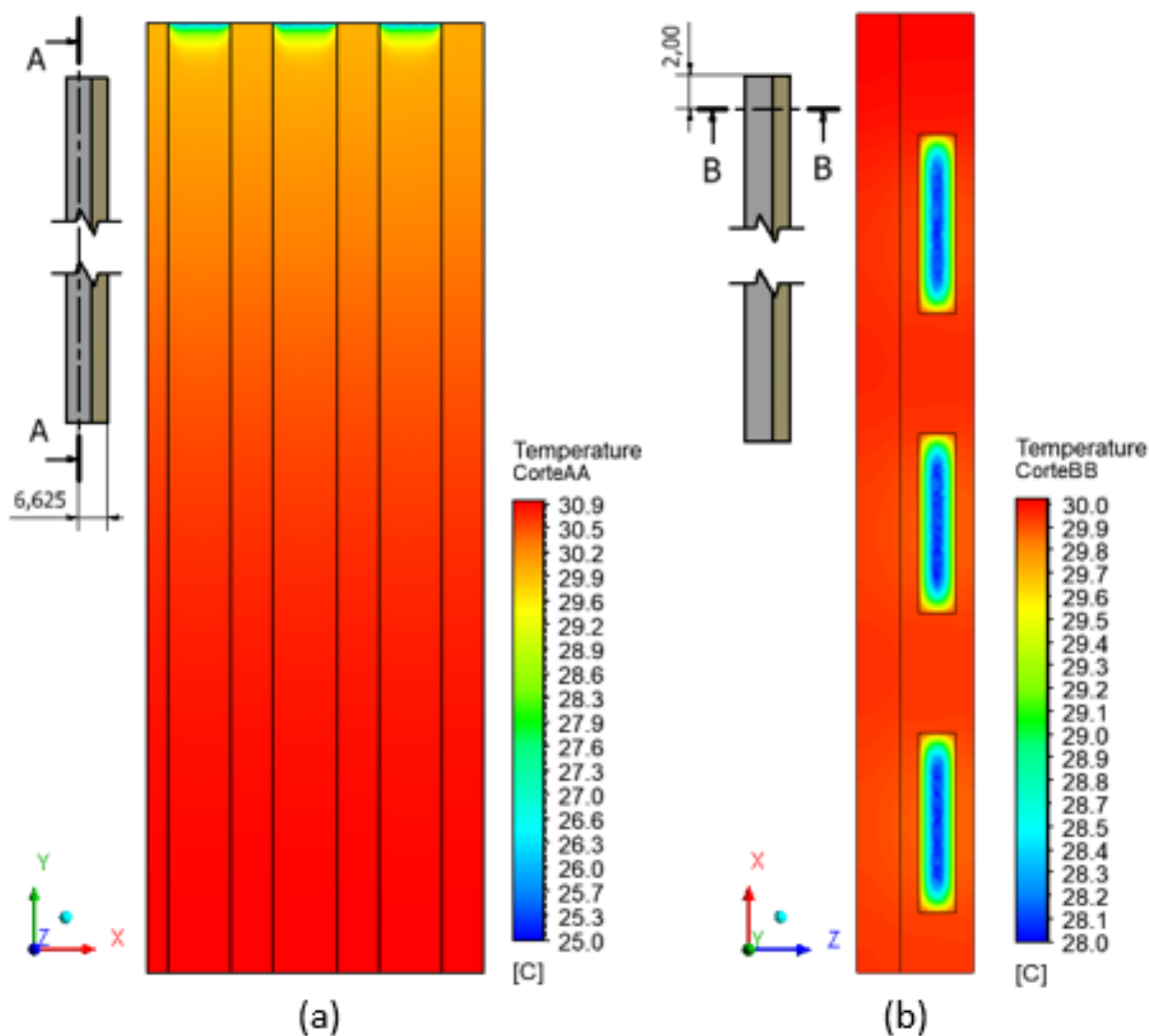


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Como calculado pela Equação 7, a potência necessária no fluido (N_f) é diretamente proporcional à velocidade de entrada (V_{in}) e cresce 300% de V1 para V2 e 810% de V2 para V3. Entretanto, o Gráfico 5 apresenta o fluxo de calor recebido pelo fluido, que aumenta de V1 para V2 em apenas 9,6%, e de V1 para V3 em 12,7%. Considerado que a velocidade V1 mantém a temperatura do conjunto abaixo de 40°C, a análise do pequeno aumento no fluxo de calor recebido pelo fluido em relação ao aumento da potência necessária introduz a discussão quanto à eficiência do trocador de calor com o aumento da velocidade de entrada.

Comprovado que V1 mantém a temperatura do fluido dentro do limite operacional de 15°C a 40°C, a Figura 4, a seguir, apresenta o gradiente de temperatura nos cortes A-A e B-B.

Figura 4 – Gradientes de Temperatura 1C e V1



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

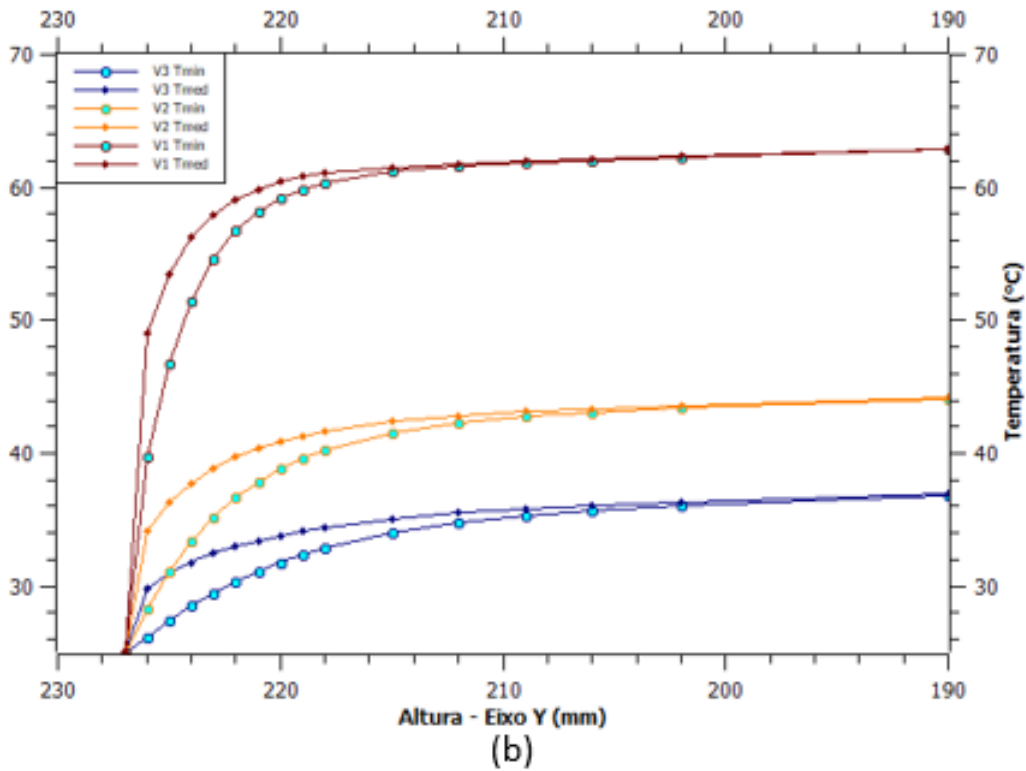
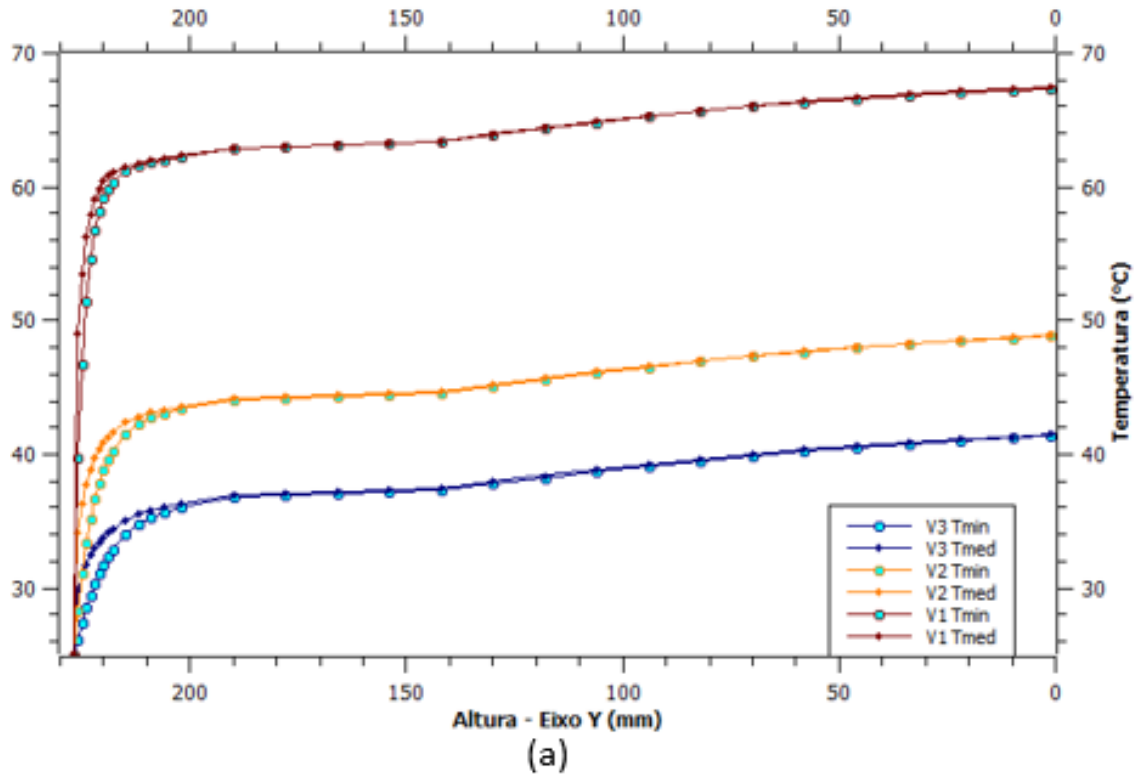
A Figura 4a apresenta o corte A-A, no centro do MCP, com variação de temperatura de $0,93^{\circ}\text{C}$. Como previsto para o regime permanente, o alto calor específico de MCP e célula mantêm uma pequena variação de temperatura ao longo da altura do corpo (eixo Y), porém uniforme na largura (eixo X) e espessura (eixo Z). A Figura 4b ilustra o perfil de temperaturas no corte B-B, na altura $Y = 225\text{mm}$, 2 mm após a entrada, em que célula e MCP apresentaram temperatura uniforme enquanto a água apresenta um gradiente radial, com temperatura mínima de $28,02^{\circ}\text{C}$ e temperatura média de $30,06^{\circ}\text{C}$.

A velocidade V1, de $0,25\text{mm/s}$, foi capaz de manter a temperatura dentro do limite operacional demandando apenas de $0,16\text{ mW}$ de potência necessária no fluido (sem considerar o rendimento total do sistema de bombeamento). A temperatura máxima registrada foi de $30,87^{\circ}\text{C}$ enquanto o fluxo de calor recebido pelo fluido foi, em média, $35,6\text{ W/m}^2$.

3.2 TAXA 3C (115 kW/m³)

A taxa 3C permite o carregamento da bateria em 20 minutos. O Gráfico 6 apresenta a temperatura média e máxima do canal 1 em 32 planos no eixo Y.

Gráfico 6 – Temperatura média e temperatura mínima (água) x Eixo Y (altura)

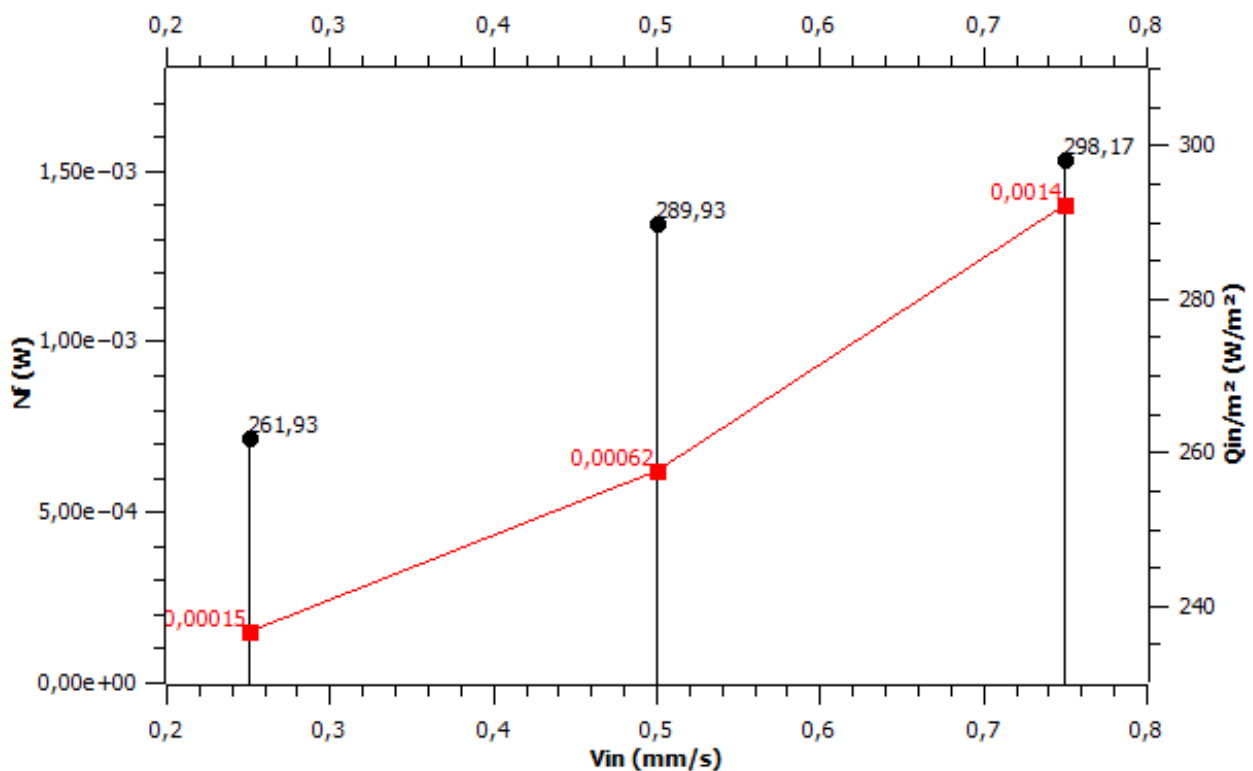


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Para a taxa 3C, com a maior velocidade de entrada, V3, o Gráfico 6a apresenta a maior temperatura do conjunto em 41,73°C, acima do limite operacional por 1,73°C. As velocidades V1 e V2, comparativamente à V3, apresentaram um aumento na temperatura máxima de 25,93°C e 7,41°C com temperaturas de 67,66°C e 49,14°C, respectivamente. O Gráfico 6b permite identificar o ponto em que a temperatura mínima na água se torna a temperatura média nos mesmos pontos encontrados para a taxa 1C como esperado, mantidos o regime permanente e a taxa de geração volumétrica homogênea, alterando apenas a variação de temperatura no conjunto. A dimensão dos canais também justifica essa rápida transição, com pequena distância entre o centro (menor temperatura) e as paredes (maior temperatura).

O Gráfico 7, a seguir, apresenta a potência necessária no fluido N_f e o fluxo de calor recebido pelo fluido Q_{in} , de acordo com as três diferentes velocidades de entrada V_{in} .

Gráfico 7 – Fluxo de calor recebido pelo fluido e potência necessária no fluido

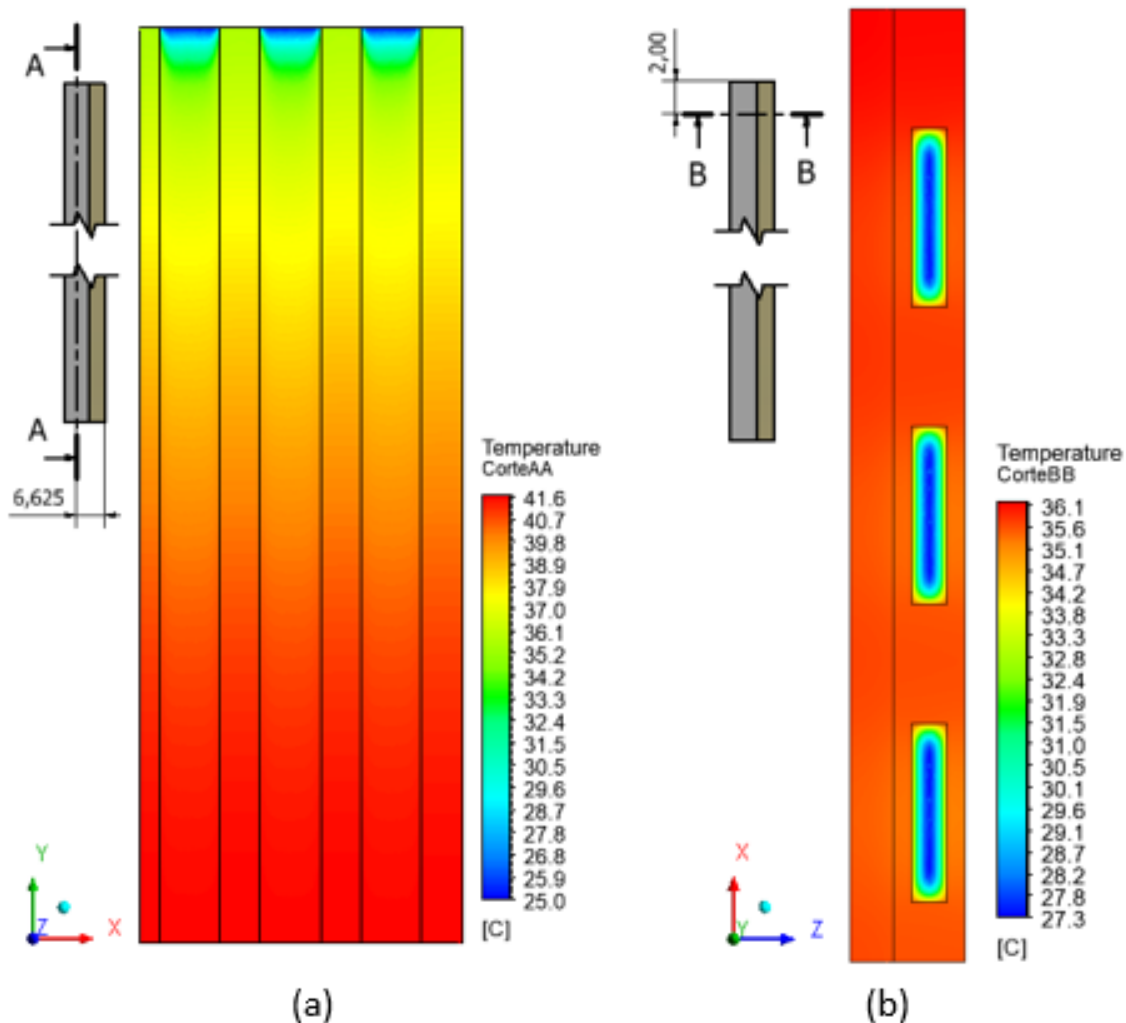


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

O Gráfico 7 corrobora com o esperado ao apresentar um fluxo de calor recebido pelo fluido proporcional à taxa de calor volumétrica gerada na célula (aumento em média de 7,40 vezes em relação à 1C, sendo a taxa de geração volumétrica de calor 7,67 vezes maior para 3C). A taxa 1C registra fluxo de calor recebido pelo fluido de 298,17 W para V3, com crescimento de 10,69% de V3 para V2 e de 13,83% de V3 para V1.

Embora nenhuma das vazões tenha mantido a temperatura abaixo de limite operacional de 40°C, a Figura 5 ilustra o gradiente de temperaturas para a velocidade V3 com taxa de 3C.

Figura 5 - Gradientes de Temperatura 3C com V3



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

A Figura 5 ilustra os gradientes de temperatura em diferentes planos no conjunto. A figura 6a apresenta o corte A-A, no centro do trocador de calor, ilustrando uma variação de temperatura de 15,9°C e rápida homogeneização da temperatura da água. Na Figura 5b, o corte B-B confirma a uniformidade na temperatura da célula, devido à alta condutividade de ambos os sólidos em contato. Ainda na figura 5b, 2 mm após a entrada do fluido refrigerante, um gradiente de temperaturas de 8,86°C mantém a temperatura do MCP, no plano, em 36,16°C.

Para a taxa 3C, com 115kW/m³, nenhuma das três vazões propostas foi capaz de manter o conjunto entre 15 e 40°C. A velocidade V3 com 0,75mm/s e potência necessária no fluido de 1,40 mW, registrou temperatura máxima de 41,73°C, com fluxo de calor através dos canais de 298,17 W/m², em média.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo do comportamento da água como fluido refrigerante em um MCP para resfriamento de célula de bateria foi apresentado nas hipóteses simplificadoras. O estudo aponta positivamente para o uso de MCP no resfriamento de placas com geração de calor por efeito Joule no geral.

Dentre as hipóteses, o modelo em regime permanente agrega valor ao estudo do fluido refrigerante, mas limita o estudo apropriado do aquecimento da célula ao não retratar a mudança das propriedades termodinâmicas com a temperatura e estado de carga (SOC). O regime permanente também não possibilita a verificação da variação de temperatura ao longo do tempo, essencial para a discussão de carregamento rápido, como no caso de 3C que acontece em 20 minutos.

Além do regime permanente, a hipótese de taxa geração volumétrica de calor uniforme impede a análise da variação de temperatura interna na célula, um dos limites operacionais. A ausência de polos na célula também simplifica a geração de calor e compromete a distribuição de temperatura heterogênea no modelo, bem como a simplificação da composição da célula com propriedades isotrópicas.

Os materiais modelados para o trocador de calor são relevantes nos resultados apresentados. A alta condutividade térmica do alumínio é essencial para o bom funcionamento do MCP, por apresentar baixa resistência à condução de calor, que é então extraído pelo fluido refrigerante nas paredes dos canais. As dimensões dos canais são importantes, pois são diretamente proporcionais ao número de Reynolds, assim podendo provocar um escoamento turbulento. O escoamento, por sua vez, pode influenciar no fator convectivo de troca de calor no fluido, otimizando o sistema.

A água como fluido refrigerante demonstrou a sua capacidade de resfriar um MCP. Contudo, a potência necessária no fluido é inversamente proporcional à densidade, como justificativa para estudar outros fluidos ou misturas. O MCP, como BTMS, pode ser adaptado de acordo com a temperatura de limite operacional propondo novos materiais e condições de contorno para aumentar a eficiência. O estudo comparativo com outros materiais e configurações de BTMS podem ser modelados com softwares de simulação numérico computacional como apresentado neste trabalho.

Como propostas de estudo e melhorias do modelo analisado, sugere-se a variação da geometria e dimensões dos canais, bem como a espessura do MCP, que podem reduzir a potência necessária no fluido e a temperatura máxima no conjunto.

REFERÊNCIAS

AMALESH, T.; NARASIMHAN, N. L. *Introducing new designs of minichannel cold plates for the cooling of Lithium-ion batteries*. *Journal of power sources*, volume 479, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877532031079X?via%3Dihub>. Acesso em: 29 de out. de 2021.

BARCELONA, S.; PIEGARI, L. *Integrated electro-thermal model for pouch lithium-ion battery*. *Mathematics and computers in simulation*, volume 183, p. 5-19, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378475420300847?via%3Dihub>. Acesso em: 20 de out. de 2021.

BENAVIDES, M.; ARIAS, A.; CERDAS, J. D.; PEREZ, A.; ORCHARD, M. *Remaining useful life of lithium-ion batteries as a function of the joule effect*. *IEEE international autumn meeting on power, electronics and computing*, 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9258726>. Acesso em: 03 de nov. de 2021.

BERNARDI, D.; PAWLIKOWSKI, E.; NEWMAN, J. A General Energy Balance for Battery Systems. *Journal of The Electrochemical Society*, Volume 132, número 1, 1985. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2113792>. Acesso em: 21 de jan. de 2022.

GRECO, A.; CAO, D.; JIANG, X.; YANG, H. *A novel electro-thermal coupled model of lithium-ion pouch battery covering heat generation distribution and tab thermal behaviours*. *Journal of power sources*, volume 257, p. 344-355, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775314001657?via%3Dihub>. Acesso em: 15 de set. de 2021.

KIM, J.; OH, J.; LEE, H. *Review on battery thermal management system for electric vehicles*. *Applied thermal engineering*, volume 149, p. 192-212, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135943111835614X?via%3Dihub>. Acesso em: 22 de out. de 2021.

KOK, C.; ALKAYA, A. **Investigation of Thermal Behavior of Lithium-Ion Batteries Under Different Loads**. *European Mechanical Science*, Volume 4, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.26701/ems.635707> . Acesso em: 12 de out. de 2021.

PATIL, M. S.; SEO, J.-H.; LEE, M.-Y. *A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management*. *Energy conversion and management*, volume 229, 2021.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890420312395?via%3Dihub>. Acesso em: 11 de out. de 2021.

PORSCHE. *World premiere of the Porsche Taycan: the sports car for a sustainable future*.

Porsche news room, 2019. Disponível em: https://newsroom.porsche.com/en_US/products/world-premiere-porsche-taycan-sports-car-sustainable-19176.html. Acesso em: 12 de out. de 2021.

DOE, U.S. *Batteries for hybrid and plug-in electric vehicles*. *Alternative fuels data center, Department of energy*, 2021. Disponível em:

https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html. Acesso em: 27 set. 2021.

WEISS, W.; RUESS, R.; KASNATSCHEEW, J.; LEVARTOVSKY, Y.; LEVY, N. R.; MINNMANN, P.; STOLZ, L.; WALDMANN, T.; WOHLFAHRT-MEHRENS, M.; AURBACH, D.; WINTER, M.; EIN-ELI, Y.; JANEK, J. *Fast charging of lithium-ion batteries: a review of materials aspects*. *Advanced energy materials*, volume 11, assunto 33, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1002/aenm.202101126>. Acesso em: 04 de nov. de 2021.

ZHANG, H.; LI, C.; ZHANG, R.; LIN, Y.; FANG, H. *Thermal analysis of a 6s4p Lithium-ion battery pack cooled by cold plates based on a multi-domain modeling framework*. *Applied thermal engineering*, volume 173, 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431119384157?via%3Dihub>. Acesso em: 11 de out. de 2021.