

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ANÁLISE NUMÉRICA DE BTMS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EMPREGANDO  
SUPERFÍCIES MÍNIMAS TRIPLAMENTE PERIÓDICAS**

por

**Felipe Pereira Neto Selmo**

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, Abril de 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE ENERGIA

ANÁLISE NUMÉRICA DE BTMS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EMPREGANDO  
SUPERFÍCIES MÍNIMAS TRIPLAMENTE PERIÓDICAS

por

Felipe Pereira Neto Selmo

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Profa. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Guilherme Henrique Fiorot, Dr.

Banca examinadora:

Prof. Felipe Roman Centeno, Dr. – DEMEC / UFRGS

Prof. Guilherme Henrique Fiorot, Dr. – DEMEC / UFRGS

Prof. Paulo Roberto Eckert, Dr. – DELET / UFRGS

Porto Alegre, 13 de abril de 2023.

## **DEDICATÓRIAS**

À minha mãe, Marina Helena, ao meu pai, Sérgio Carlos e à minha irmã, Victória. O amor e apoio de vocês durante os períodos de maior dúvida e cansaço reforçaram o quão forte sou com a minha família e quanta sorte eu tenho em poder desfrutar o tempo com vocês. Durante este período difícil, cada gesto de carinho e cuidado comigo serão guardados para sempre. Curtas palavras jamais expressariam o amor, o orgulho e a gratidão que sinto por vocês, e, assim, busco, todos os dias, continuar amando vocês.

Às pessoas que estiveram ao meu lado durante a graduação e que me ajudaram a enxergar a vida sobre uma perspectiva diferente.

Aos meus animais de estimação, Nina, João, Bernardo e Clarice, por mostrarem-me que o amor é puro, humilde e nunca pede algo em troca.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Orientador, Professor Guilherme Henrique Fiorot, primeiramente, por ter aceitado orientar-me e por tê-lo feito de maneira excelente, estando sempre disponível para auxiliar-me e guiar-me ao longo deste trabalho. Agradeço por ter apoiado as minhas ideias e pelo incentivo em continuar minha produção acadêmica no futuro.

Agradeço ao Professor Andrés A. M. Zevallos por ter acreditado em mim e concedido minha primeira oportunidade de produção científica e ter orientado-me no projeto de Iniciação Científica Voluntária, sendo sempre gentil e solícito.

Agradeço aos colegas de Engenharia da UFRGS, em especial ao Bernardo Letsch e ao Lorenzo Filippini, por compartilharem, ao longo da graduação, de momentos divertidos e leves. Agradeço à parceria e excelência nos inumeráveis trabalhos em grupo produzidos com o Lorenzo Filippini, que muitas vezes terminavam em *calls* conversando sobre a vida e afins. Vocês fizeram esta jornada mais especial.

Agradeço aos colegas do período de Renova Jr., cuja experiência fez-me madurecer dentro do ambiente universitário, além de ter contribuído com minha visão crítica dentro da Engenharia.

Agradeço aos colegas do escritório da ENGYS Brasil por terem agregado um valor inestimável na minha formação em CFD e Engenharia e por terem proporcionado um ambiente sempre gentil e confortável para que eu pudesse crescer como profissional e pessoa. Agradeço, em especial, aos Engenheiros Lisandro Maders e Gustavo Almeida por terem confiado no meu potencial, assim oferecendo-me uma vaga de estágio na ENGYS e permitindo-me trabalhar na área em que sou apaixonado. Agradeço também a disponibilização da *workstation* para que eu pudesse realizar as simulações deste trabalho.

Agradeço aos Professores com os quais tive a honra de ter aula e de ter aprendido não só sobre Engenharia, mas sobre profissionalismo e excelência.

Por fim, agradeço aos funcionários terceirizados, servidores administrativos e Professores da UFRGS por fazerem desta Universidade um exemplo de Ensino Público Superior de qualidade – o qual acredito ser peça inquestionável para o desenvolvimento deste País.

SELMO, F. P. N. **Análise Numérica de BTMS de Veículos Elétricos Empregando Superfícies Mínimas Triplamente Periódicas**. 2023. 32 f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## RESUMO

Os crescimentos do mercado e da utilização de carros elétricos e híbridos – vinculados aos incentivos para redução de gases de efeito estufa e à geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis – inserem a também crescente necessidade de melhoria em autonomia e segurança do sistema de armazenamento de energia desses veículos. Nesse contexto, Sistemas de Gerenciamento Térmico de Baterias (em inglês *Battery Thermal Management System* ou BTMS) assumem um papel fundamental, isto é, buscam garantir uma condição térmica adequada nas células de bateria. Aliado a isso, o crescimento de técnicas de manufatura aditiva amplia a possibilidade de investigação de diferentes topologias que buscam melhorar a transferência de calor nesses sistemas. Assim, este trabalho tem por objetivo estudar numericamente, empregando o *software* OpenFOAM®, o efeito no processo em regime permanente de resfriamento líquido indireto de células cilíndricas de íon de Lítio devido à utilização de um BTMS composto por dutos baseados em Superfícies Mínimas Triplamente Periódicas (SMTP). O sistema baseado em SMTP, comparado a um de referência (o qual apresenta dutos compostos por paralelepípedos), reduz a temperatura máxima do conjunto de células em mais de 2 K e melhora levemente a uniformidade de suas temperaturas – porém aumenta a perda de carga nos dutos de resfriamento, o que implica em uma baixa performance térmica (em média 0,86). Esse cenário indica que a aplicação do sistema SMTP estudado prioriza uma operação térmica mais adequada do conjunto de células em detrimento de um gasto energético maior associado ao funcionamento do BTMS.

**PALAVRAS-CHAVE:** Superfícies Mínimas Triplamente Periódicas, BTMS, OpenFOAM®

SELMO, F. P. N. **Numerical Analysis of Electric Vehicles' BTMS using Triply Periodic Minimal Surfaces**. 2023. 32p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## **ABSTRACT**

The growth of the market and the use of electric and hybrid cars – related to incentives to reduce greenhouse gases and the generation of electricity from renewable sources – insert the also growing need for improvement in the autonomy and safety of the energy storage systems for these vehicles. In this context, Battery Thermal Management Systems (BTMS) assume a fundamental role, that is, they seek to guarantee an adequate thermal condition in the battery cells. Allied to this, the growth of additive manufacturing techniques expands the possibility of investigating different topologies that seek to improve heat transfer in these systems. Thus, this work aims to numerically study, using the OpenFOAM® software, the effect on the steady state process of indirect liquid cooling of cylindrical Li-ion cells due to the use of a BTMS composed of ducts based on Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS). The TPMS-based system, compared to a reference one (which features pipelines made of parallelepipeds), reduces the maximum temperature of the cell set by more than 2 K and slightly improves the uniformity of their temperatures – but increases the pressure drop in cooling ducts, which implies a low thermal performance (on average 0,86). This scenario indicates that the application of the studied TPMS system prioritizes a more adequate thermal operation of the set of cells to the detriment of a higher energy expenditure associated with the operation of the BTMS.

**KEYWORDS:** Triply Periodic Minimal Surfaces, BTMS, OpenFOAM®

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de baterias para aplicação automotiva.....	3
Figura 2 - Exemplos de BTMS com sistema de resfriamento líquido indireto.....	4
Figura 3 - Exemplos de estruturas baseadas em SMTP de Schwarz ( $c = 0,3$ ).....	5
Figura 4 - Fluxograma da Metodologia.....	9
Figura 5 - Geração de calor em uma célula de bateria em função do tempo para uma descarga de 2C.....	10
Figura 6 - Esquema da geometria completa e região de simulação.....	10
Figura 7 - Geometria comum em perspectiva tridimensional.....	11
Figura 8 - Construção de duto do sistema SMTP.....	12
Figura 9 - Temperaturas máximas e médias nas células.....	19
Figura 10 - Máxima diferença de temperatura e desvio padrão do campo de temperaturas por célula de bateria.....	20
Figura 11 - Histogramas de temperaturas para Célula 8.....	20
Figura 12 - Distribuição radial de temperaturas na Célula 1 para sistemas REF e SMTP.....	21
Figura 13 - Número de Nusselt médio avaliado em seções ao longo do eixo $x$ para Duto D2.....	21
Figura 14 - Média da Velocidade local avaliada em seções ao longo do eixo $x$ para Duto D2.....	22
Figura 15 - Número de Nusselt médio e média da velocidade ao longo de intervalo selecionado do eixo $x$ para geometria baseada em SMTP para Duto D2.....	22
Figura 16 - Análise dos números de onda da velocidade e do número de Nusselt médios locais em duto D2 do sistema SMTP.....	23
Figura 17 - Magnitude do vetor velocidade no domínio de fluido para seções do duto D2 do sistema SMTP.....	23

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades da célula de bateria NCM811.....	9
Tabela 2 - Parâmetros geométricos do BTMS.....	11
Tabela 3 - Parâmetros geométricos de construção do duto do sistema SMTP.....	12
Tabela 4 - Comparação de parâmetros geométricos entre sistemas.....	13
Tabela 5 - Propriedades termofísicas e de transporte dos materiais dos sistemas.....	14
Tabela 6 - Número de Reynolds para os dois sistemas.....	15
Tabela 7 - Comparação de parâmetros gerais entre sistemas REF e SMTP.....	18

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relações de conservação das grandezas físicas.....	6
Quadro 2 - Condições de contorno.....	14
Quadro 3 - Hipóteses de simplificação do problema.....	15

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BTMS	Do inglês <i>Battery Thermal Management System</i>
CCV	Ciclo de Compressão de Vapor
D1	Duto número 1 do BTMS
D2	Duto número 2 do BTMS
D3	Duto número 3 do BTMS
DTFS	Do inglês <i>Discrete Time Fourier Series</i>
FFT	Do inglês <i>Fast Fourier Transform</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
IEA	Do inglês <i>International Energy Agency</i>
MCI	Motor de Combustão Interna
NCM	Níquel-Cobalto-Manganês
ONU	Organização das Nações Unidas
REF	Sistema de referência do BTMS
SMTF	Superfícies Mínimas Triplamente Periódicas
SOC	Do inglês <i>State Of Charge</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Latinos

$A$	Área de seção reta de um duto de resfriamento [m <sup>2</sup> ]
$A_f$	Área de transferência de calor entre fluido e bloco metálico [m <sup>2</sup> ]
$A_{s,\xi_a,12}$	Área de transferência de calor de um duto avaliada entre posições genéricas 1 e 2 em um eixo parametrizado $\xi_a$ [m <sup>2</sup> ]
$c$	Parâmetro de nível da superfície de uma SMTP [m]
$C_P$	Calor específico à pressão constante [J/(kgK)]
$CO_2$	Dióxido de Carbono [-]
$D$	Comprimento característico de duto [m]
$D_p$	Diâmetro médio de poro [m]
$D_h$	Diâmetro hidráulico de duto [m]
$d_d$	Lado das seções quadradas de entrada e saída dos dutos de resfriamento [m]
$e_{a(j+1,j)}$	Erro relativo associado a variáveis monitoradas para malhas $j$ e $j+1$
$e_{ext(j+1,j)}$	Erro relativo associado a variáveis monitoradas extrapoladas para malhas $j$ e $j+1$
$e_s$	Energia interna específica em um domínio sólido genérico [J/kg]
$f$	Fator de atrito de Fanning [-]
$f_o$	Fator de atrito de Fanning para duto de referência [-]
$GCI$	Índice de convergência de malha [-]
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/(m <sup>2</sup> K)]
$h_f$	Entalpia específica em um domínio fluido genérico [J/kg]
$\bar{h}$	Média do coeficiente de transferência de calor por convecção considerando a totalidade de duto genérico [W/(m <sup>2</sup> K)]
$\bar{h}_{D1}$	Média do coeficiente de transferência de calor por convecção considerando a totalidade do duto D1 [W/(m <sup>2</sup> K)]
$\bar{h}_{D2}$	Média do coeficiente de transferência de calor por convecção considerando a totalidade do duto D2 [W/(m <sup>2</sup> K)]
$\bar{h}_{D3}$	Média do coeficiente de transferência de calor por convecção considerando a totalidade do duto D3 [W/(m <sup>2</sup> K)]
$\bar{h}_x$	Média do coeficiente de transferência de calor por convecção para uma seção de duto centralizada em $x$ [W/(m <sup>2</sup> K)]
$\bar{h}_{\xi_a,12}$	Média do coeficiente de transferência de calor por convecção para uma seção de duto centralizada em posição genérica 12 do eixo parametrizado $\xi_a$ [W/(m <sup>2</sup> K)]
$I$	Corrente elétrica em uma célula de bateria [A]
$K$	Permeabilidade de um meio poroso [m <sup>2</sup> ]
$k_f$	Condutividade térmica do fluido [W/(mK)]
$k_s$	Condutividade térmica do fluido [W/(mK)]
$l$	Comprimento periódico de uma SMTP [m]
$L_{cd}$	Distância mínima entre célula de bateria e parede do duto [m]
$L_d$	Comprimento característico do meio poroso
$L_{D1,o}$	Distância entre duto D1 e origem do sistema [m]
$L_{D1,D2}$	Distância entre dutos D1 e D2 [m]
$L_{D2,D3}$	Distância entre dutos D2 e D3 [m]
$LiNi_{0,8}Co_{0,1}Mn_{0,1}O_2$	Composição química da célula de bateria NCM considerada
$\dot{m}$	Vazão mássica em um duto de resfriamento [kg/s]
$\mathbf{n}$	Vetor unitário normal de uma superfície [-]
$N$	Número total de volumes em uma malha [-]
$N_a$	Número de amostras de um sinal discreto [-]
$Nu$	Número de Nusselt [-]
$\overline{Nu}$	Média do número de Nusselt considerando totalidade de um duto genérico [-]
$\overline{Nu}_{D1}$	Média do número de Nusselt considerando totalidade do duto D1 [-]
$\overline{Nu}_{D2}$	Média do número de Nusselt considerando totalidade do duto D2 [-]
$\overline{Nu}_{D3}$	Média do número de Nusselt considerando totalidade do duto D3 [-]

$\overline{Nu}_x$	Média do número de Nusselt para uma seção do duto centralizada em $x$ [-]
$\overline{Nu}_{\xi_{a,12}}$	Média do número de Nusselt para uma seção do duto centralizada em posição genérica $12$ do eixo parametrizado $\xi_a$ [-]
$P$	Pressão [Pa]
$p_g$	Ordem aparente do método GCI
$q''$	Fluxo de calor [W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{Q}_c$	Geração de calor em uma célula de bateria [W]
$\dot{q}_f$	Geração de calor volumétrico em um domínio de fluido genérico [W/m <sup>3</sup> ]
$\dot{q}_s$	Geração volumétrica de calor em um domínio sólido genérico [W/m <sup>3</sup> ]
$\dot{q}_s _b$	Geração volumétrica de calor na região do bloco metálico [W/m <sup>3</sup> ]
$\dot{q}_s _c$	Geração volumétrica de calor em uma célula cilíndrica [W/m <sup>3</sup> ]
$R$	Resistência elétrica da célula de bateria [ $\Omega$ ]
$r^{(j+1,j)}$	Razão de refino entre duas malhas consecutivas $j$ e $j+1$ [-]
$Re$	Número de Reynolds [-]
$Re_h$	Número de Reynolds avaliado com diâmetro hidráulico de um duto [-]
$Re_p$	Número de Reynolds avaliado com diâmetro médio de poro de um meio poroso [-]
$s_g$	Parâmetro de cálculo de $\lambda$ do método GCI
$S_{h_f}$	Termo fonte na Equação de Conservação de Energia expressa por entalpia [W/m <sup>3</sup> ]
$S_{e_s}$	Termo fonte na Equação de Conservação de Energia expressa por energia interna [W/m <sup>3</sup> ]
$S_\phi$	Termo fonte associado à uma propriedade intensiva genérica $\phi$
$t$	Tempo [s]
$T$	Temperatura [K]
$T_c$	Temperatura em uma célula de bateria [K]
$T_{max,c}$	Temperatura máxima em uma célula de bateria [K]
$T_{med,c}$	Temperatura média em uma célula de bateria [K]
$T_{med,f}$	Temperatura média do fluido em uma seção reta de duto de resfriamento [K]
$u$	Componente no eixo $x$ da velocidade do fluido [m]
$U_{oc}$	Tensão de circuito aberto da célula de bateria [V]
$v$	Componente no eixo $y$ da velocidade do fluido [m]
$\vec{V}$	Campo vetorial de velocidades nos domínios de fluido [m/s]
$V_c$	Volume de uma célula cilíndrica de bateria [m <sup>3</sup> ]
$V_d$	Volume do duto [m <sup>3</sup> ]
$V_i$	Volume de um volume finito em uma malha [m <sup>3</sup> ]
$V_{in,med}$	Velocidade média na entrada de um duto [m/s]
$V_{med}$	Velocidade média ponderada pela vazão mássica em uma seção de duto de resfriamento [m/s]
$V_T$	Volume da envoltória do duto [m <sup>3</sup> ]
$w$	Componente no eixo $z$ da velocidade do fluido [m]
$x$	Eixo do sistema de coordenadas cartesiano global do sistema [m]
$y$	Eixo do sistema de coordenadas cartesiano global do sistema [m]
$z$	Eixo do sistema de coordenadas cartesiano global do sistema [m]

### Símbolos Gregos

$\alpha_j$	Variável genérica monitorada em uma malha genérica $j$
$\alpha_{ext(j+1,j)}$	Variável genérica monitorada extrapolada considerando malhas $j$ e $j+1$
$\gamma$	Equação tridimensional de uma SMTP [-]
$\Gamma_\phi$	Coefficiente de difusão associado à uma propriedade intensiva genérica $\phi$
$\delta$	Tamanho representativo de malha [m]
$\Delta T_{c,max}$	Máxima diferença de temperatura em uma célula de bateria [K]
$\Delta P$	Perda de carga [Pa]

$\epsilon$	Porosidade de um meio poroso [-]
$\epsilon_{(j+1,j)}$	Diferença entre variável genérica monitorada para duas diferentes malhas ( $j+1$ e $j$ )
$\eta$	Performance térmica [-]
$\lambda$	Parâmetro de cálculo de ordem aparente do método GCI
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido [kg/(ms)]
$\vec{\xi}$	Espaço de coordenadas parametrizadas genéricas [-]
$\xi_a$	Componente $a$ do espaço vetorial $\vec{\xi}$ [-]
$\xi_b$	Componente $b$ do espaço vetorial $\vec{\xi}$ [-]
$\xi_c$	Componente $c$ do espaço vetorial $\vec{\xi}$ [-]
$\rho$	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_{T_c}$	Desvio padrão do campo de temperaturas em uma célula de bateria [K]
$\phi$	Propriedade intensiva genérica
$\Phi$	Dissipação viscosa [1/s <sup>2</sup> ]
$\psi$	Função discreta genérica
$\Psi$	DTFS de uma função discreta genérica $\psi$
$\omega$	Frequência angular nas Equações de SMTP [rad/m]

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1 Sistemas de gerenciamento térmico de baterias.....	3
2.2 Superfícies mínimas triplamente periódicas.....	4
2.3 Equações de conservação.....	5
2.4 Meios porosos.....	6
2.5 Modelagem da geração de calor da bateria.....	7
2.6 Estudo de qualidade de malha.....	7
2.7 Análise de sinais discretos através da Série de Fourier.....	8
3 METODOLOGIA.....	8
3.1 Célula de bateria e geração de calor.....	9
3.2 Geometria.....	10
3.3 Pré-processamento.....	13
3.3.1 Malhas computacionais.....	13
3.3.2 Condições de contorno.....	13
3.3.3 Propriedades termofísicas e de transporte dos materiais.....	14
3.3.4 Hipóteses.....	14
3.3.5 Configurações gerais da simulação computacional.....	15
3.4 Pós-Processamento e análise dos resultados.....	16
4 RESULTADOS.....	17
4.1 Estudo de qualidade de malha.....	17
4.2 Análise geral dos sistemas.....	17
4.3 Análise detalhada dos sistemas.....	19
4.3.1 Campos de temperatura nas células de bateria.....	19
4.3.2 Número de Nusselt médio e velocidade média.....	21
5 CONCLUSÃO.....	23
6 REFERÊNCIAS.....	25
APÊNDICE A – Estudo de Qualidade de Malha.....	29
APÊNDICE B – Padrão de Escoamento no Sistema SMTP.....	31
APÊNDICE C – Parâmetros do fenômeno de transferência de calor por convecção forçada.....	31

## 1 INTRODUÇÃO

O início do desenvolvimento de políticas ambientais a partir do final do século XX – como o Protocolo de Kyoto e a Eco-92 – instituiu a pauta das emissões de Gases de Efeito Estufa<sup>1</sup> (GEE) nos governos mundiais. Em 2015, o Acordo de Paris solidificou o compromisso global e cíclico (ONU, 2022) de reduzir essas emissões visando diminuir os efeitos do aquecimento global. Dentro desse contexto, o setor de transportes, composto majoritariamente por veículos de Motor de Combustão Interna (MCI), impacta diretamente o quadro de emissões de GEE. A exemplo disso, no ano de 2020, consoante a *European Environment Agency*, o setor de transporte doméstico representou 22,21 % das emissões de GEE na União Europeia.

Em contrapartida, os veículos elétricos podem apresentar uma série de benefícios quando comparados aos veículos de MCI – como maior eficiência energética do veículo e a capacidade de menor emissão de GEE quando associados a sistemas de geração de energia elétrica de baixa emissão de GEE, conforme relata a *International Energy Agency* (IEA), 2020. Dessa forma, os veículos elétricos ganham relevância no presente desenvolvimento de políticas energéticas dos países, motivando políticas de incentivo – como, por exemplo, o pacote *Fit-for-55* da União Europeia, o qual estimula a transição para os veículos elétricos e híbridos (IEA, 2022).

Atualmente, os resultados dessas medidas promovem o crescimento da indústria de veículos elétricos em regiões como China, Europa e EUA – atingindo, por exemplo, um aumento de mais de 105% nas vendas combinadas de carros elétricos *plug-in* e a bateria no continente europeu de 2019 para 2020 (IEA, 2022). Não obstante, a melhoria e o desenvolvimento dos veículos elétricos – especialmente em relação às baterias (vida útil, segurança e autonomia) – representa um desafio contínuo para essa indústria, conforme Deng et al. (2018), o qual está vinculado a sua ampliação de mercado e à capacidade desses veículos de compor um cenário de menor emissão de GEE e de menor impacto ambiental.

Nesse cenário, o Sistema de Gerenciamento Térmico das Baterias (*Battery Thermal Management System*<sup>2</sup>, *BTMS*) de um veículo elétrico é essencial para o controle de operação, a segurança e a melhoria de vida útil do sistema de baterias, especialmente baterias de Íon de Lítio - as quais são utilizadas largamente na indústria automotiva e são muito sensíveis a mudanças de temperatura (KIM, OH, LEE, 2018). Consoante Ianicello, Biwolé e Achard (2018), manter a operação das baterias dentro de um intervalo pequeno de temperaturas, isto é, sem excessivos aumentos de temperatura, evita a redução da capacidade e autonomia das células.

Dessa maneira, a simulação numérica de um BTMS permite compreender não só a distribuição de temperatura nas células do sistema de baterias dada uma condição de operação, mas também estudar os efeitos globais e localizados no processo de transferência de calor de acordo com variações de composição e/ou operação do BTMS.

Diversos tipos de sistemas são modelados para avaliar o processo de resfriamento durante a descarga das baterias. Nesse contexto, sistemas com resfriamento líquido e ar foram comparados no trabalho de Han et al. (2019). Os autores apontaram valores típicos muito diferentes para a razão entre a taxa de calor transferida das células da bateria para o fluido e a diferença entre a temperatura média delas e a temperatura de entrada dele: 500 W/K para o primeiro tipo, e 70 W/K para o segundo tipo, indicando, relativamente, a potencial melhor capacidade de resfriamento de sistemas empregando líquidos.

Em especial para células cilíndricas de bateria, diferentes configurações são estudadas a partir das variações de parâmetros geométricos do BTMS e de escoamento. Aplicados a esse tipo de bateria, sistemas que dispõem de microcanais ou serpentinas e superfícies estendidas atingem bons resultados no controle térmico da bateria. No trabalho de Rao et al. (2017), um sistema de resfriamento líquido empregando água é estudado. A análise paramétrica realizada apontou que maiores diâmetros dos microcanais resultam em maior uniformidade de temperatura nas células e maiores velocidades de entrada reduzem drasticamente a máxima temperatura das células (menos de 32°C para 0,1 m/s, por exemplo).

---

1 Os Gases de Efeito Estufa, através de sua capacidade de absorção de radiação, são gases com o potencial de contribuir para o efeito de aquecimento na atmosfera terrestre.

2 O termo em inglês *Battery Thermal Management System* refere-se aos sistemas de gerenciamento térmico de baterias de veículos elétricos, o que pode incluir sistemas com refrigerantes (ciclo fechado), com líquidos, a ar, com aletas ou com materiais de mudança de fase - além de uma combinação de dois ou mais sistemas citados.

Além disso, sistemas que usam serpentinas acopladas a blocos metálicos, conforme foi explorado por Wang et al. (2020) – cujo trabalho abrangeu um estudo de variações de configuração de escoamento d'água – podem respeitar requisições de operação térmica, porém com limitação na potência de funcionamento do sistema de acordo com a vazão volumétrica. Nesse trabalho, além de o decréscimo da temperatura máxima das células ocorrer rapidamente, foi constatada uma uniformidade adequada de temperaturas - especialmente para escoamentos paralelos com diferença máxima de temperatura, para o melhor caso, de 4,17°C.

A fim de aumentar a área de contato, Tete, Gupta e Joshi (2022) propuseram uma geometria que encapsula as células cilíndricas, isolando-as do fluido (água), o qual tem entrada e saída no domínio em lados opostos. O BTMS foi simulado para diferentes descargas da bateria: para um intervalo de descarga de 0,5 a 5 C<sup>3</sup>, a temperatura média das baterias é mantida abaixo de 30°C. Além disso, as temperaturas são maiores para células interiores do conjunto – apesar de que a diferença máxima de temperaturas é menor que 3°C.

Com objetivo similar, Fan, Gao e Liu (2022) desenvolveram um sistema modular de resfriamento células cilíndricas - o qual emprega estruturas baseadas em Superfícies Mínimas Triplamente Periódicas (SMTP)<sup>4</sup> para compor feixes de tubos contidos em um suporte metálico (o qual é a interface de troca térmica entre fluido e bateria). Essas estruturas são caracterizadas pela grande razão área de superfície e volume, o que é benéfico para sistemas compactos de transferência de calor uma vez que, no contexto do sistema, os componentes internos do duto aumentam a área de transferência de calor da parede do duto para o fluido refrigerante. Os autores construíram diferentes tubos com a utilização das SMTP baseadas no Tipo P de Schwarz e compararam essa topologia com tubos retos: ao fim de uma descarga de 2 C - apesar de a perda de carga crescer significativamente, a máxima diferença de temperatura para o primeiro sistema fica abaixo de 1,5 °C, enquanto que o segundo, fica acima de 2,5 °C.

A fim de investigar outro tipo de superfície mínima triplamente periódica, Attarzadeh, Rovira e Duwig (2021), estudaram o efeito de diferentes estruturas baseadas em uma SMTP Tipo D de Schwarz dentro de um duto com parede parcialmente aquecida. Os melhores resultados do ponto de vista de transferência de calor, garantiram, em regime permanente, um número de Nusselt acima de 40 para toda a faixa de Reynolds ( $Re$ ) simulada (25 a 125) – o que representa mais do que o dobro quando comparado aos resultados do duto simulado sem a estrutura. Apesar disso, a perda de carga no sistema com a SMTP apresenta um comportamento proporcional ao quadrado do número de Reynolds – o que pode ser um problema na operação com faixas maiores de  $Re$ .

Dessa forma, este trabalho objetiva estudar numericamente o efeito da utilização de estruturas baseadas em SMTP do Tipo D de Schwarz em dutos de um sistema de resfriamento líquido para baterias de carros elétricos para células cilíndricas de íon de Lítio. Para tal, é utilizado o *software* OpenFOAM® (The OpenFOAM Foundation Ltd., 2022) para simulação térmica e fluidodinâmica e são desenvolvidos *scripts* em linguagem Python para análise de dados. Como objetivos específicos, são realizadas:

- Simulações, em regime permanente, de BTMS com e sem estrutura baseada em SMTP para uma vazão mássica de 0,536 g/s a fim de resfriar um conjunto de dezesseis células cilíndricas de bateria do tipo  $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{Mn}_{0,1}\text{O}_2$  (21700) com geração de calor média associada a uma descarga de 2 C;
- Comparações entre números de Nusselt médios, velocidades médias, perda de carga e performance térmica entre os sistemas citados anteriormente; e
- Comparações entre as temperaturas máximas e médias nas células de bateria para sistema com e sem SMTP.

---

3 A taxa de descarga C de uma bateria é uma medida que representa a corrente com a qual a bateria descarrega. Para uma bateria com capacidade nominal de 1 Ah, uma taxa de descarga de 0,5 C representaria uma corrente de descarga de 0,5 A e um tempo de descarga de 2 h.

4 Superfícies Mínimas Triplamente Periódicas são superfícies que apresentam, dentro de uma região delimitada no espaço, uma área mínima – além de localmente apresentar curvatura média igual a zero e serem continuamente periódicas nas coordenadas do espaço cartesiano (ASSIS, 2021).

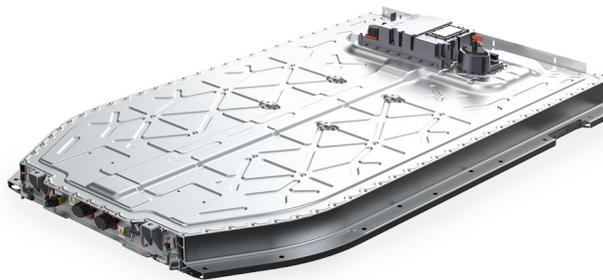
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Sistemas de gerenciamento térmico de baterias

Os sistemas de armazenamento de energia de um veículo elétrico, amplamente, empregam baterias de íon de Lítio conforme indicam Kim, Oh e Lee (2018). Um exemplo desse tipo de sistema para aplicação automotiva é encontrado na Figura 1.

Nesse contexto, aspectos como performance e vida útil de baterias de íon de Lítio têm relação com as temperaturas de operação desses componentes (BANDHAUER, GARIMELLA, FULLER, 2011). Dessa forma, um Sistema de Gerenciamento Térmico de Baterias tem por função garantir uma operação térmica adequada do conjunto de baterias de um veículo elétrico.

**Figura 1** - Sistema de baterias para aplicação automotiva.



Fonte: LG (2023).

A classificação de um BTMS pode partir, conforme abordam Tete, Gupta e Moshi (2021), de diversos critérios, como:

- Consumo de energia elétrica: sistemas ativos (que apresentam consumo) ou passivos;
- Meio de transferência de calor: ar, líquido e/ou materiais de mudança de fase;
- Configurações de escoamento de fluido de resfriamento: em série, em paralelo e escoamento cruzado;
- Técnicas adicionais de resfriamento: utilização de, por exemplo, aletas, geradores de vórtices e/ou elementos de resfriamento termoelétrico.

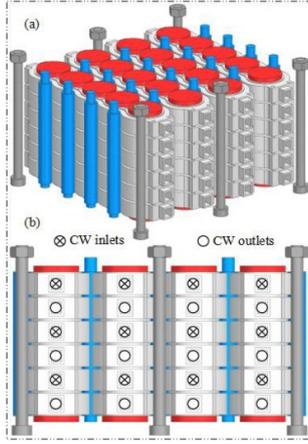
De maneira mais elementar, Kim, Oh e Lee (2018) resumem a classificação de um BTMS a partir da presença de um Ciclo de Compressão de Vapor (CCV). Nesse contexto, sistemas que aproveitam o ar resfriado da cabine do veículo, apresentam ciclos secundários de resfriamento líquido ou utilizam resfriamento direto de refrigerante (em um ciclo bifásico) são classificados como sistemas com CCV. Por outro lado, sistemas que dependem exclusivamente de aletas, elementos termoelétricos e/ou materiais de mudança de fase são incluídos no grupo sem CCV.

Um BTMS que utiliza um sistema de resfriamento líquido, compondo um sistema secundário de resfriamento, pode ser classificado em sistema direto ou indireto. O primeiro tipo apresenta a transferência de calor entre líquido e célula de bateria mediado por um meio sólido que separa fisicamente o fluido e a bateria. Em relação ao segundo tipo – nos quais as células ficam submersas em fluido - podem ocorrer problemas de curto-circuito (XIA, CAO, BI, 2017).

Nesse contexto, para células cilíndricas de baterias, sistemas modulares são desenvolvidos a fim de que sejam estabelecidos escoamentos em microcanais - os quais são construídos a partir de materiais metálicos. Esse tipo de sistema é ilustrado na Figura 2(a), na qual é representado um corte para o arranjo antiparalelo das correntes de fluido de resfriamento – geralmente uma mistura de água e glicol, conforme relata Thakur et al. (2020). Além disso, um tipo de sistema envolvendo SMTP com arranjo de escoamento unidirecional é ilustrado na Figura 2.b.

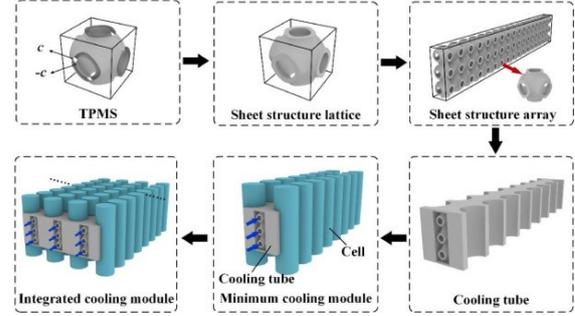
**Figura 2** - Exemplos de BTMS com sistema de resfriamento líquido indireto.

(a) Sistema modular com escoamento em arranjo antiparalelo.



Fonte: Liang et al. (2022).

(b) Sistema modular com escoamento em arranjo unidirecional.



Fonte: Fan, Gao, Liu. (2022).

## 2.2 Superfícies mínimas triplamente periódicas

As Superfícies Mínimas Triplamente Periódicas (SMTP) são superfícies definidas em um espaço tridimensional - as quais, além de minimizar a área em uma região delimitada espacialmente e apresentar curvatura média local nula, são periódicas nas três dimensões cartesianas (ASSIS, 2021). Essas superfícies podem ser descritas implicitamente a partir de equações tridimensionais ( $\gamma(x, y, z)$ ), como as SMTP de Schwarz do Tipo P, D e G – definidas, respectivamente, pelas Equações 1, 2 e 3 (RAJAGOPALAN, ROBB, 2006). A frequência angular  $\omega$  é definida pela Equação 4 em que  $l$  é o comprimento periódico, e  $c$  é o parâmetro de nível da superfície delimitado pela região com limites definidos nas Equações 5, 6 e 7 (FAN, GAO, LIU, 2022).

$$\gamma(x, y, z) = \cos(\omega x) + \cos(\omega y) + \cos(\omega z) = c \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \gamma(x, y, z) &= \sin(\omega x)\sin(\omega y)\sin(\omega z) + \sin(\omega x)\cos(\omega y)\cos(\omega z) \\ &+ \cos(\omega x)\sin(\omega y)\cos(\omega z) + \cos(\omega x)\cos(\omega y)\sin(\omega z) = c \end{aligned} \quad (2)$$

$$\gamma(x, y, z) = \cos(\omega x)\sin(\omega y) + \cos(\omega y)\sin(\omega x) + \cos(\omega z)\sin(\omega x) = c \quad (3)$$

$$\omega = 2\pi/l \quad (4)$$

$$-l/2 \leq x \leq l/2 \quad (5)$$

$$-l/2 \leq y \leq l/2 \quad (6)$$

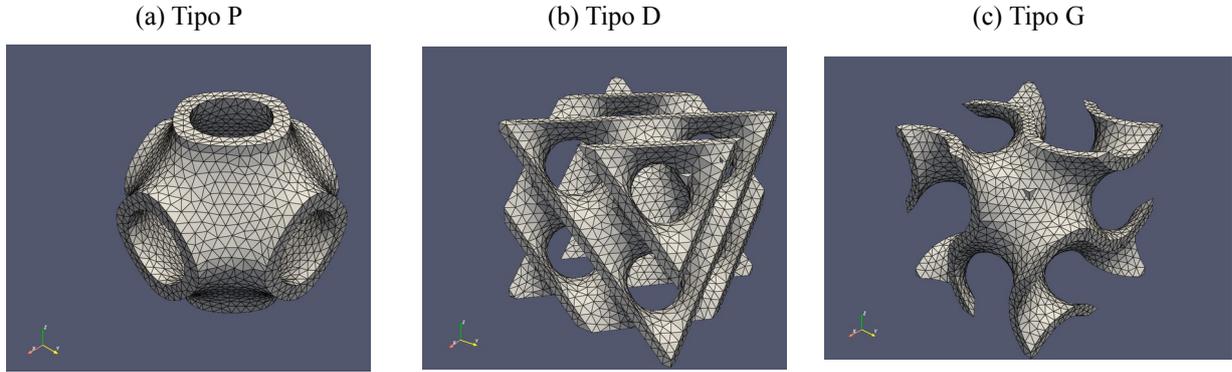
$$-l/2 \leq z \leq l/2 \quad (7)$$

A construção de estruturas baseadas em SMTP é viabilizada a partir do crescimento e popularização de técnicas de manufatura aditiva (ATTARZADEH, ROVIRA, DUWIG, 2021). Nesse contexto, uma maneira de construí-las é definir duas regiões do tipo  $\gamma_1(x, y, z) \geq -c$  e  $\gamma_2(x, y, z) \leq c$  e definir um volume  $V_{SMTP} = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 | (x, y, z) \in \gamma_1 \cap \gamma_2\}$  (AL-KETAN et al., 2020), ou seja, atribuindo uma espessura ao recém gerado sólido, a qual é controlada pelo nível  $c$ . Alguns exemplos dessas estruturas são encontradas na Figura 3.

A aplicação dessas estruturas em trocadores de calor e sistemas semelhantes é motivada especialmente pelo fato de uma SMTP dividir a região em duas sub-regiões separadas (PENG, GAO, HU 2019). Isso pode intensificar o processo de transferência de calor uma vez que o escoamento é estabelecido paralelamente nessas duas sub-regiões e, então, a área de contato entre fluido e parede

aquecida/resfriada cresce. Além disso, a propriedade de alta razão entre área de superfície e volume é atribuída a essa questão topológica (PENG, GAO, HU, 2019) – fator muito importante em aplicações compactas de trocador de calor em que o peso e volume das estruturas de dutos são questões relevantes de projeto.

**Figura 3** - Exemplos de estruturas baseadas em SMTP de Schwarz ( $c = 0,3$ ).



Fonte: o Autor.

### 2.3 Equações de conservação

As equações que descrevem os fenômenos físicos de transporte de energia e momentum no domínio físico do conjunto BTMS e bateria podem ser generalizadas a partir de uma equação. Dessa forma, a equação de conservação de uma propriedade intensiva genérica  $\phi$  é dada pela Eq. 8 (MALISKA, 2004) – sendo  $\Gamma_\phi$  e  $S_\phi$ , respectivamente, o coeficiente de difusividade e o termo fonte de  $\phi$ . O primeiro e o segundo termos do lado esquerdo da Eq. 8 representam, respectivamente, os termos transiente e de advecção (originado pelo movimento de fluido caracterizado por um campo de velocidades  $\vec{V}$ ), enquanto que, do lado direito, o primeiro e o segundo termos representam, respectivamente, o termo difusivo e fonte.

A geração de calor volumétrica é representada por  $\dot{q}$  nas Equações 9 e 11 e a dissipação viscosa ( $\Phi$ ) é expressa pela Eq. 10. A pressão no campo fluidodinâmico é representada por  $P$  e o coeficiente de difusão para as Equações de Momentum coincidem com a viscosidade dinâmica do fluido ( $\mu$ ). A propriedade térmica é a condutividade térmica ( $k$ ) - a qual leva subíndice  $f$  para representar o domínio do fluido e  $s$  para representar o do sólido. Os termos fonte das equações de conservação de Momentum, para um fluido newtoniano, tem o formato consoante Equações 12 a 14.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{V}) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi\nabla\phi) + S_\phi \quad (8)$$

$$S_{h_f} = \dot{q}_f + \mu\Phi \quad (9)$$

$$\Phi = 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (10)$$

$$S_{e_s} = \dot{q}_s \quad (11)$$

$$S_u = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nabla \cdot \left( \mu \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \nabla \cdot \vec{V}) \quad (12)$$

$$S_v = -\frac{\partial P}{\partial y} + \nabla \cdot \left( \mu \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\mu \nabla \cdot \vec{V}) \quad (13)$$

$$S_w = -\frac{\partial P}{\partial z} + \nabla \cdot \left( \mu \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\mu \nabla \cdot \vec{V}) \quad (14)$$

O Quadro 1 resume a relação entre a grandeza física que é conservada através da aplicação de uma propriedade intensiva  $\phi$  escalar na Eq. 8, assim como os respectivos coeficiente de difusão e termo fonte.

**Quadro 1** - Relações de conservação das grandezas físicas.

Grandeza física de conservação	Propriedade intensiva conservada ( $\phi$ )	Termo fonte ( $S_\phi$ )	Coefficiente de Difusão ( $\Gamma_\phi$ )
Massa	1	0	0
Energia	Entalpia no meio fluido ( $h_f$ )	Eq. 9	$k_f$
Energia	Energia interna no meio sólido ( $e_s$ )	Eq. 11	$k_s$
Momentum em $x$	Componente cartesiana de $\vec{V}$ na direção $x$ ( $u$ )	Eq. 12	$\mu$
Momentum em $y$	Componente cartesiana de $\vec{V}$ na direção $y$ ( $v$ )	Eq. 13	$\mu$
Momentum em $z$	Componente cartesiana de $\vec{V}$ na direção $z$ ( $w$ )	Eq. 14	$\mu$

Fonte: o Autor.

## 2.4 Meios porosos

Um meio poroso, conforme definido por Nield e Bejan (2006), é composto por um meio sólido dotado de espaços vazios, isto é, que não são sólidos. Esses espaços devem formar, segundo os autores, caminhos conectados entre si. Para sistemas que utilizam meios porosos em aplicações de transferência de calor envolvendo convecção forçada, Incropera (2007) adiciona que o meio poroso, então, consiste em um meio sólido e um meio fluido.

É possível calcular a porosidade de um meio poroso  $\epsilon$  através da Eq. 15, sendo  $V_v$  o volume dos espaços vazios e  $V_T$  o volume total do meio, a permeabilidade  $K$  (considerando escoamento laminar) conforme Eq. 16 (ATTARZADEH, ROVIRA e DUWIG, 2021). Os termos  $V_{in,med}$ ,  $\Delta P$  e  $L_x$  representam, respectivamente, a velocidade média na seção de entrada, a perda de carga e o comprimento característico do meio.

$$\epsilon = V_v/V_T \quad (15)$$

$$K = \frac{\mu V_{in,med}}{\Delta P/L_d} \quad (16)$$

A caracterização de um escoamento em um meio poroso, conforme Wood, He e Apte (2020), pode relacionar-se ao número de Reynolds considerando o diâmetro médio do poro  $D_p$  de acordo com a Equação 17. Nesse contexto, para  $Re_p < 25$ , o escoamento é muito próximo a um escoamento de Stokes e, para  $25 < Re_p < 375$ , podem começar a acontecer efeitos inerciais em relação ao movimento de fluido através do meio poroso. A fim de relacionar essas faixas de caracterização ao diâmetro hidráulico de um meio poroso, consoante os autores, o número de Reynolds para um diâmetro hidráulico  $D_h$  – dado pela Equação 18 (INCROPERA, 2007) – é relacionado a  $Re_p$  conforme Equação 19. Nessas equações  $V_{med}$  é a velocidade média do escoamento, usualmente tomada na entrada do duto (tópico detalhado no Apêndice C).

$$Re_p = \frac{\rho V_{med} D_p}{\mu} \quad (17)$$

$$Re_h = \frac{\rho V_{med} D_h}{\mu} \quad (18)$$

$$Re_h = Re_p \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \quad (19)$$

## 2.5 Modelagem da geração de calor da bateria

Para descrever o comportamento térmico da bateria, torna-se necessário modelar o termo de geração de calor do domínio físico delas. Dessa forma, a partir da Eq. 11, para cada célula da bateria é atribuído um termo fonte.

Nesse contexto, a geração de calor, em baterias de íon de Lítio, é mais significativa durante a descarga (SAITO, SHIKANO, KOBAYASHI, 2013) – especialmente para valores de Estado de Carga, (do inglês, *State of Charge* ou SOC) no começo e no final da descarga. O termo de geração de calor na bateria (representada pelo subíndice  $c$ ) pode ser expresso conforme Eq. 20 (FAN, GAO e LIU, 2022) cujos primeiro e segundo termos representam, respectivamente, a geração de calor irreversível e a reversível do processo de descarga da bateria.

Os termos  $I$  e  $U_{oc}$  da Eq. 20 representam, respectivamente, a corrente elétrica da bateria e sua tensão de circuito aberto. Já os termos  $\frac{dU_{oc}}{dT_c}$  (coeficiente térmico de entropia) e  $R$  (resistência interna da bateria) são obtidos experimentalmente – sendo expressos geralmente como valores constantes ou funções polinomiais da SOC.

$$\dot{Q}_c = I^2 R + IT_c \frac{dU_{oc}}{dT_c} \quad (20)$$

## 2.6 Estudo de qualidade de malha

Uma simulação numérica envolve discretizar o domínio físico e representá-lo através de uma malha, a qual não deve impactar significativamente o resultado numérico, isto é, somente os erros vinculados aos esquemas numéricos devem apresentar uma influência significativa no valor numérico que a simulação gera. Para isso, o Índice de Convergência de Malha (do inglês, *Grid Convergence Index* ou GCI), método descrito em Celik et al. (2008), é uma métrica para estimar a qualidade de uma malha em relação à diferença entre o valor da solução de um escalar vinculado a essa malha e o valor assintótico que ele assumiria com refinamento que gerasse uma resolução de malha que descreve continuamente a geometria do domínio físico.

Para tal, é definido um conjunto de três malhas com níveis de refinamento diferentes – representadas pelos índices  $j$ ,  $j + 1$  e  $j + 2$ , cuja ordem crescente indica o aumento do refino na malha. Para cada uma delas, é calculado o tamanho representativo ( $\delta$ ) – expresso na Eq. 21 (em que  $N$  é o número de volumes de controle na malha e  $V_i$  é o volume de um volume finito da malha) e o fator de refinamento de malha ( $r_{(j+1,j)}$ ) – dado na Eq. 22.

$$\delta = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \right]^{1/3} \quad (21)$$

$$r_{(j+1,j)} = \frac{\delta_{j+1}}{\delta_j} \quad (22)$$

O erro de uma variável  $\alpha$  associado a duas malhas consecutivas é calculado consoante Eq. 23. Posteriormente, é possível calcular a ordem aparente  $p$ , conforme Equações 24 a 26.

$$\varepsilon_{(j+1,j)} = \alpha_{j+1} - \alpha_j \quad (23)$$

$$p_g = \frac{1}{\ln(r_{(j+1,j)})} \left| \ln \left| \frac{\varepsilon_{(j+2,j+1)}}{\varepsilon_{(j+1,j)}} \right| + \lambda(p_g) \right| \quad (24)$$

$$\lambda(p_g) = \ln \left( \frac{r_{(j+1,j)}^{p_g} - s_g}{r_{(j+2,j+1)}^{p_g} - s_g} \right) \quad (25)$$

$$s_g = \frac{\varepsilon_{(j+2,j+1)}/\varepsilon_{(j+1,j)}}{|\varepsilon_{(j+2,j+1)}/\varepsilon_{(j+1,j)}|} \quad (26)$$

Na análise de GCI para duas malhas,  $j$  e  $j+1$ , o valor da variável  $\alpha$  é extrapolado ( $\alpha_{ext}$ ) de acordo com a Equação 27. Os erros relativos, considerando os valores obtidos pela simulação numérica e seus valores extrapolados, são calculados, respectivamente, pelas Equações 28 e 29. Por fim, GCI da solução para a faixa assintótica é calculado através da Equação 30. Dessa maneira, pode-se reportar o valor do GCI como a incerteza numérica associada a uma malha menos refinada ( $j$ ) em relação a outra mais refinada ( $j+1$ ) – consoante CELIK et al. (2008).

$$\alpha_{ext(j+1,j)} = \frac{r_{(j+1,j)}^{p_g} \alpha_1 - \alpha_2}{r_{(j+1,j)}^{p_g} - 1} \quad (27)$$

$$e_{a(j+1,j)} = \left| \frac{\alpha_j - \alpha_{j+1}}{\alpha_j} \right| \quad (28)$$

$$e_{ext(j+1,j)} = \left| \frac{\alpha_{ext(j+1,j)} - \alpha_j}{\alpha_{ext(j+1,j)}} \right| \quad (29)$$

$$GCI_{(j+1,j)} = \frac{1,25 |\varepsilon_{(j+1,j)}|}{r_{(j+1,j)}^{p_g} - 1} \quad (30)$$

## 2.7 Análise de sinais discretos através da Série de Fourier

O aspecto de periodicidade das estruturas baseadas em SMTP e sua influência em parâmetros fluidodinâmicos e térmicos de um sistema de resfriamento líquido podem ser analisados a partir da Série de Fourier de Tempo Discreto (com sigla em inglês DTFS para *Discrete Time Fourier Series*) utilizando dados de uma simulação numérica (dados discretos). Dado um sinal discreto  $\psi[n]$  com  $N_a$  amostras, sua representação por DTFS é expressa nas Equações 31 e Equação 32 (HAYKIN, 2001), em que o comprimento de onda fundamental é  $N_a$  e  $\lambda_o = 2\pi/N_a$ .

Adota-se as grandezas comprimento de onda ( $n$ ) e número de onda ( $\kappa$ ) uma vez que as análises em Série de Fourier relacionam-se a grandezas espaciais no escopo deste trabalho.

$$\psi[n] = \sum_{k=0}^{N_a-1} \Psi[k] e^{j\kappa\lambda_o n} \quad (31)$$

$$\Psi[\kappa] = \frac{1}{N_a} \sum_{n=0}^{N_a-1} \psi[n] e^{-j\kappa\lambda_o n} \quad (32)$$

## 3 METODOLOGIA

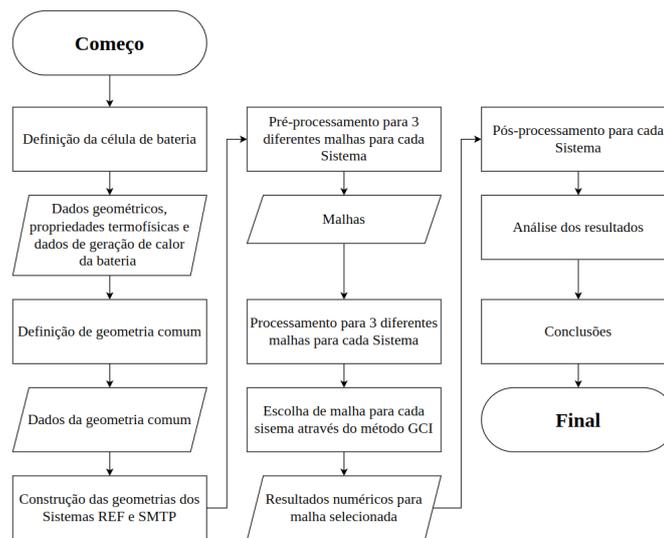
A metodologia é resumida na Figura 4. Parte-se da escolha de um modelo de célula cilíndrica de bateria, fornecendo informações para a construção da geometria comum a dois tipos de BTMS: os sistemas REF e SMTP. Esses sistemas diferem quanto ao tipo de duto de resfriamento empregado: enquanto que o primeiro é um paralelepípedo (duto vazio), o segundo contém, internamente, estruturas baseadas em SMTP.

Para cada um dos sistemas são geradas três malhas a fim de realizar um Estudo de Qualidade de Malha por Sistema utilizando o método GCI, o qual é detalhado na Seção 2.6. O método de GCI é aplicado considerando a totalidade da malha multirregião para as sondas de temperatura uma vez que existe um acoplamento de solução numérica entre energia interna nos domínios sólidos e entalpia nos domínios de fluido. Entretanto, considerando que as propriedades termofísicas do fluido são constantes e

uniformes, não há acoplamento entre solução fluidodinâmica (pressão e velocidade) e solução de energia e entalpia – sendo, portanto, utilizada a malha referente ao domínio de fluido para aplicação do método GCI.

Dessa maneira, é escolhida uma malha, para cada sistema, cujos resultados advindos da aplicação do método em questão sejam satisfatórios. Por fim, são realizadas as etapas de Pós-Processamento dos resultados numéricos de cada sistema e de análises comparativas entre eles, além de análises detalhadas sobre o processo de transferência de calor no sistema SMTP.

**Figura 4 - Fluxograma da Metodologia.**



Fonte: o Autor.

### 3.1 Célula de bateria e geração de calor

O modelo adotado de célula cilíndrica de bateria de Íon de Lítio é do tipo Níquel-Cobalto-Manganês 811 (NCM811) com índice 21700 (referente às dimensões da célula), a qual é amplamente utilizada em veículos elétricos (WANG et al., 2021). As propriedades geométricas, elétricas e termofísicas são condensadas na Tabela 1.

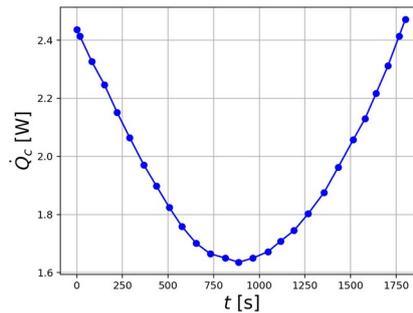
**Tabela 1 - Propriedades da célula de bateria NCM811.**

Propriedade	Valor	Unidade
Diâmetro	$21 \times 10^{-3}$	m
Altura	$70 \times 10^{-3}$	m
Condutividade térmica na direção radial	1,15	W/(m·K)
Condutividade térmica na direção axial	23,34	W/(m·K)
Calor específico	1070	J/(kg·K)
Massa específica	2751	kg/m <sup>3</sup>
Tensão nominal	3,6	V
Capacidade	4,6	Ah

Fonte: Wang et al. (2021).

O termo de geração de calor transiente, para uma descarga de 2C, é extraído dos dados experimentais de Wang et al. (2021) utilizando a ferramenta digital Plotdigitizer® (PORBITAL, 2023) – cuja representação está disposta na Figura 5. Os autores consideram que a geração de calor na bateria não é uma função da temperatura – ignorando o termo de geração de calor irreversível da Equação 20. Para a simulação em regime permanente, portanto, é calculada a média temporal desse termo, cujo valor é de 1,9344 W. Esse valor é considerado uma representação razoável do termo transiente de geração de calor, uma vez que o desvio padrão do conjunto de dados temporais é de 0,2904 W ou 15,01 % da média.

**Figura 5** - Geração de calor em uma célula de bateria em função do tempo para uma descarga de 2C.



Fonte: adaptado de Wang et al. (2021).

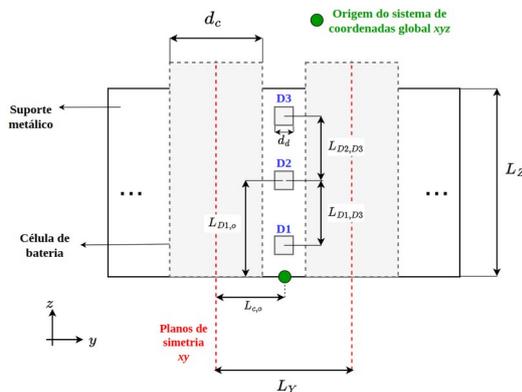
### 3.2 Geometria

A geometria do sistema simulado é baseada em sub-módulos de seis células em série e oito em paralelo (configuração 6S8P), estudados, por exemplo, no trabalho de He et al. (2022). As células são inseridas em um bloco metálico de alumínio, cuja altura é menor que a altura das células. Entre conjuntos de células em série, existem três dutos de resfriamento – D1, D2 e D3 – os quais apresentam seções, nas entradas e saídas, quadradas e são internos ao bloco.

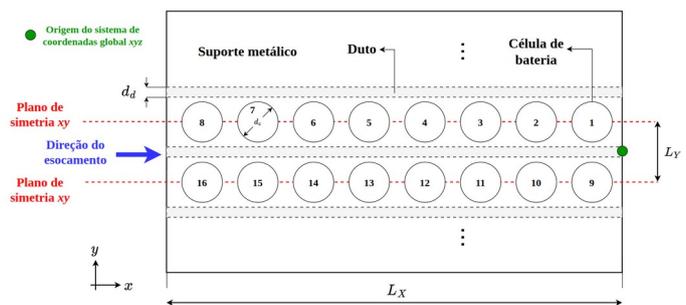
A fim de simplificar a simulação e reduzir o custo computacional necessário, são aplicados dois planos de simetria com normal paralela ao eixo *y* – uma simplificação semelhante àquela de FAN, GAO e LIU (2022). Dessa forma, a geometria é composta por diferentes regiões: dezesseis células de bateria, um bloco metálico e três dutos de resfriamento. Um esquema da geometria nos planos *xy* e *yz* é providenciado na Figura 6.

**Figura 6** - Esquema da geometria completa e região de simulação.

(a) Esquema da geometria completa no plano *yz*.



(a) Esquema da geometria completa no plano *xy*.



Fonte: o Autor.

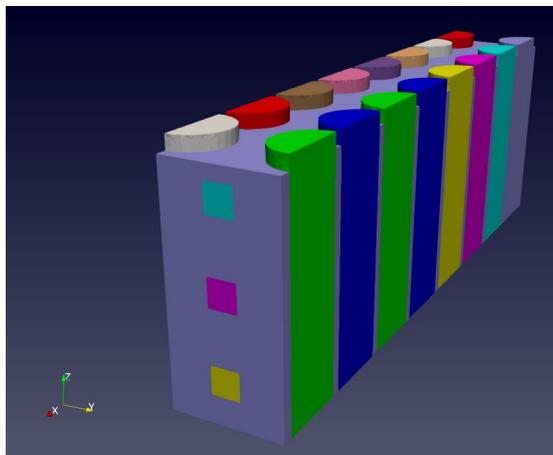
Dessa maneira, cada célula de bateria, indexada conforme Figura acima, consiste em um semicilindro com altura e diâmetro especificados na Tabela 1. Os parâmetros geométricos da Figura 6 são dispostos na Tabela 2. Uma visão tridimensional da geometria comum aos sistemas é fornecida na Figura 7.

**Tabela 2** - Parâmetros geométricos do BTMS.

Parâmetro	Representação	Valor	Unidade
Comprimento do sistema simulado	$L_x$	$192 \times 10^{-3}$	m
Largura do sistema simulado	$L_y$	$32 \times 10^{-3}$	m
Altura do bloco metálico	$L_z$	$66 \times 10^{-3}$	m
Lado da seção quadrada na entrada dos dutos	$d_d$	$8 \times 10^{-3}$	m
Distância entre origem e plano de simetria $xy$	$L_{c,o}$	$16 \times 10^{-3}$	m
Distância entre centro do duto D1 e origem	$L_{D1,o}$	$35 \times 10^{-3}$	m
Distância entre os centros dos dutos D1 e D2	$L_{D1,D2}$	$23 \times 10^{-3}$	m
Distância entre os centros dos dutos D2 e D3	$L_{D2,D3}$	$23 \times 10^{-3}$	m

Fonte: o Autor.

**Figura 7** - Geometria comum em perspectiva tridimensional.



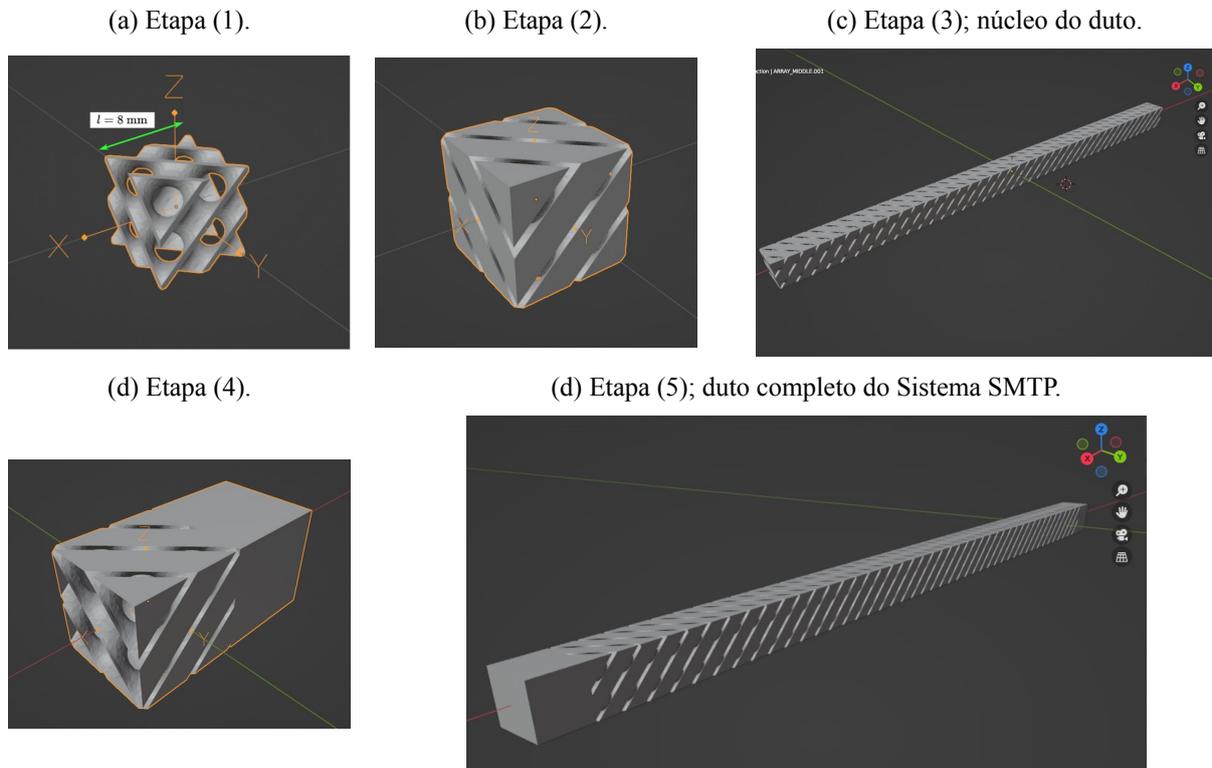
Fonte: o Autor. Reprodução: Paraview® (2023).

A construção do duto do Sistema SMTP é feita conforme as seguintes etapas:

- (1) Construção da superfície da unidade fundamental de SMTP, representando um domínio sólido (parede interna do duto). Essa etapa utiliza a técnica abordada na Seção 2.2. É escolhida a superfície mínima triplamente periódica Tipo D de Schwarz (Equação 2).
- (2) Operação booleana de diferença entre superfície envoltória ao SMTP e unidade fundamental de SMTP, gerando um domínio fundamental de fluido.
- (3) Replicação, ao longo do eixo  $x$ , do domínio fundamental de fluido gerado na Etapa (2), caracterizando o núcleo do duto.
- (4) Construção de seções de entrada e saída, sendo cada uma composta por um domínio fundamental de fluido e por um paralelepípedo.
- (5) Inclusão das seções da Etapa (4) no núcleo do duto.

A Etapa (1) é realizada utilizando códigos no *software* GNU Octave® (EATON, 2022), que gera o conjunto de pontos no espaço a partir da equação da SMTP (Equação 2). As Etapas (2) a (5) foram realizadas utilizando o *software* Blender®. Os parâmetros geométricos vinculados às etapas anteriores são dispostos na Tabela 3.

**Figura 8** - Construção de duto do sistema SMTP.



Fonte: o Autor. Reprodução: Blender® (2023).

**Tabela 3** - Parâmetros geométricos de construção do duto do sistema SMTP.

Parâmetro	Representação	Valor	Unidade
Tipo de SMTP	-	Tipo-D de Schwarz	-
Nível de superfície	$c$	0,3	-
Comprimento periódico	$l$	$8 \times 10^{-3}$	m
Número de domínios fundamentais de fluido da Etapa (2)	-	20	-
Comprimento total do núcleo da Etapa (3)	-	$160 \times 10^{-3}$	m
Comprimento combinado de paralelepípedo e domínio fundamental de fluido em cada seção da Etapa (4)	-	$16 \times 10^{-3}$	m
Comprimento total do duto do sistema SMTP	-	$192 \times 10^{-3}$	m

Fonte: o Autor.

O comprimento característico  $D$  dos dutos de ambos os Sistemas é calculado conforme a Equação 33, que representa o diâmetro hidráulico de um duto (INCROPERA, 2007), em que  $A_f$  é a área da superfície de interface entre fluido e meio sólido e  $V_d$  é o volume do duto. Para dutos baseados em estruturas geradas a partir de superfícies mínimas triplamente periódicas, é utilizada a mesma equação para cálculo do diâmetro hidráulico no trabalho de Tang et al. (2023).

$$D = \frac{4V_d}{A_f} \quad (33)$$

Dessa maneira, os diâmetros hidráulicos dos Sistemas e os parâmetros da Equação 33, além da porosidade associada ao duto do Sistema SMTP (Equação 15) são dispostos na Tabela 4.

**Tabela 4** - Comparação de parâmetros geométricos entre sistemas.

Parâmetro	Sistema de referência	Sistema baseado em SMTP
$A_f$ [m <sup>2</sup> ]	$6,144 \times 10^{-3}$	$15,7139 \times 10^{-3}$
$A_f/V_d$ [m <sup>-1</sup> ]	500	1628
$D$ [m]	$8,000 \times 10^{-3}$	$2,457 \times 10^{-3}$
$\epsilon$ [-]	-	0,7855

Fonte: o Autor.

### 3.3 Pré-processamento

#### 3.3.1 Malhas computacionais

As malhas computacionais, representações do domínio físico discretizado, são geradas utilizando os geradores nativos do OpenFOAM®: o *blockMesh* e o *snappyHexMesh*. O primeiro é responsável por gerar uma malha base, a qual, através do segundo, será refinada em determinadas superfícies para melhor adequação à superfície de geometria original, além de ser responsável por criar refinamentos internos e camadas de prismas, por exemplo. Detalhes de configuração das malhas são encontrados no Apêndice A.

Para simulações multirregião, primeiramente é construída uma malha utilizando as utilidades acima e – posteriormente – torna-se necessário o comando *splitMeshRegions* para separar a malha única nos domínios de malha computacional para cada região. As regiões, portanto, são aquelas especificadas na Seção 3.2.

#### 3.3.2 Condições de contorno

As condições de contorno da simulação numérica são encontradas no Quadro 2. Para todas as superfícies externas ou limítrofes do sistema é adotada uma condição de contorno adiabática a fim de compreender isoladamente o processo de resfriamento das baterias pelos BTMS estudados.

Além disso, as superfícies internas (interfaces) são tratadas numericamente através de condições de contorno de temperatura acoplada, em que não são consideradas resistências térmicas de contato. O campo de temperaturas em todos os domínios é inicializado com temperatura de 298 K.

Por fim, a escolha do valor de 0,0084 m/s para a velocidade de entrada nos dutos de resfriamento deve-se ao fato de esse valor corresponder a valores de número de Reynolds dentro de intervalos comuns encontrados em trabalhos com aplicações semelhantes. Alguns exemplos são encontrados nos trabalhos de Attarzadeh, Rovira e Duwig (2021) e Fan, Gao e Liu (2022).

**Quadro 2** - Condições de contorno.

Região	Superfície	Condição de contorno
Bloco metálico	Paredes externas	Neumann: $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ ; $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ ; $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ [K/m]
Células de bateria	Superfícies sem interface com bloco metálico	Neumann: $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ ; $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ ; $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ [K/m]
Dutos (D1 a D3)	Entrada ( $x = 0$ m)	Dirichlet: $u = 0,0084$ ; $v = 0$ ; $w = 0$ [m/s] $T = 298$ K
	Saída ( $x = 192 \times 10^{-3}$ m)	Dirichlet: $P = 0$ (Pa)
	Parede dos dutos	Dirichlet: $u = 0$ ; $v = 0$ ; $w = 0$ [m/s]

Fonte: o Autor.

### 3.3.3 Propriedades termofísicas e de transporte dos materiais

As propriedades termofísicas e de transporte do bloco metálico e do fluido são descritas na Tabela 5. Em relação às propriedades das células de bateria, as informações são encontradas na Seção 3.1.

**Tabela 5** - Propriedades termofísicas e de transporte dos materiais dos sistemas.

Região	Material	Propriedade	Valor	Unidade
Bloco metálico e paredes dos dutos	Alumínio	$\rho$	2699,2	kg/m <sup>3</sup>
		$C_p$	897	J/(kg·K)
		$k$	237	W/(m·K)
Fluido	Água saturada (avaliada na temperatura de 25°C)	$\rho$	996,9	kg/m <sup>3</sup>
		$C_p$	4182,6	J/(kg·K)
		$k$	0,606	W/(m·K)
		$\mu$	$890 \times 10^{-6}$	kg/(m·s)

Fonte: Yue et al. (2015).

### 3.3.4 Hipóteses

As equações de conservação descritas na Seção 2.3 recebem as hipóteses e considerações organizadas no Quadro 3. As simulações analisam os comportamentos térmico e fluidodinâmico dos sistemas em regime permanente (Hipótese 1). Isso é realizado a fim de comparar os desempenhos desses sistemas ao final do período de descarga, quando as temperaturas máximas e temperaturas médias costumam ser maiores para BTMS semelhantes – conforme observado nos trabalhos de Fan, Gao e Liu (2022) e Wang et al. (2020).

Para tal, o conteúdo transiente do termo de geração de calor nas células é sintetizado em uma média temporal conforme a Seção 3.1 (Hipótese 2). Nesse sentido, adota-se que esse termo de geração de calor é uniforme na região da célula de bateria (Hipótese 3), implicando que o termo de geração volumétrica de calor em uma célula ( $\dot{q}_s|_c$ ) é dado pela Equação 34, em que  $\dot{Q}_c$  é a média temporal do termo de geração de calor da bateria (1,9344 W conforme Seção 3.1) e  $V_c$  é o volume da célula cilíndrica ( $2,42 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>, considerando dimensões da Seção 3.1).

$$\dot{q}_s|_c = \dot{Q}_c/V_c \quad (34)$$

**Quadro 3** - Hipóteses de simplificação do problema.

Índice	Descrição	Implicação
1	As propriedades termofísicas e de transporte dos materiais são constantes e uniformes (Seção 3.3.3).	-
2	O fenômeno físico é avaliado em regime permanente.	$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = 0$
3	A média temporal do termo de geração de calor é suficientemente representativa para caracterizar uma geração de calor típica de uma célula de bateria.	-
4	O termo de geração de calor em uma célula de bateria é uniforme e tem valor de 1,9344 W (Seção 3.1).	$\dot{q}_s _c = 1675,4793 \text{ W/m}^3$
5	O termo de dissipação viscosa na Equação 10 é desprezível uma vez que não se trata de um fluido com alto valor de viscosidade dinâmica nem há um grande gradiente de velocidade devido à natureza laminar do escoamento (JUNCU, 2015).	$\Phi = 0$
6	Os termos de geração volumétrica de calor nos domínios de fluido e no domínio do bloco metálico são nulos.	$\dot{q}_f = 0 \text{ W/m}^3$ $\dot{q}_s _b = 0 \text{ W/m}^3$
7	Os escoamentos nos dutos, tanto no Sistema REF quanto no SMTP, são laminares e incompressíveis.	-

Fonte: o Autor.

Considerando as definições de número de Reynolds da Seção 2.4, os diâmetros hidráulicos da Seção 3.2, as propriedades termofísicas e de transporte da Seção 3.3.3 e a condição de contorno de velocidade nas entradas dos dutos (Quadro 2) - os números de Reynolds são determinados para cada Sistema conforme explicitado na Tabela 6. Dessa forma, os escoamentos nos dutos dos dois Sistemas são considerados laminares (Hipótese 7) tendo em vista que: O número de Reynolds para o duto do Sistema de Referência é menor que 2300 (INCROPERA, 2007).

- O número de Reynolds baseado no diâmetro médio de poro é menor que 25 – conforme detalhado na Seção 2.4.

**Tabela 6** - Número de Reynolds para os dois sistemas.

Sistema de referência	Sistema baseado em SMTP
75,0	23,1 (baseado no diâmetro hidráulico) 6,3 (baseado no diâmetro médio de poro)

Fonte: o Autor.

### 3.3.5 Configurações gerais da simulação computacional

Para a simulação da transferência de calor conjugada nos sistemas, é utilizado o *solver chtMultiRegionFoam* do software OpenFOAM® (The OpenFOAM Foundation Ltd., 2022), utilizando a entrada *steadyState* para esquema de temporal a fim de realizar as simulações em regime permanente. O controle de convergência da solução numérica foi realizado considerando um número máximo de iterações do algoritmo de solução *PIMPLE* de 3500 e parada forçada do *solver* caso as sondas localizadas na célula 16 e duto D1 apresentassem, em conjunto, solução estacionária por no mínimo 25 iterações para

as variáveis medidas. As localizações das sondas e os nomes das variáveis observadas são detalhados no Quadro A.1 do Apêndice A.

### 3.4 Pós-Processamento e análise dos resultados

Para a extração dos campos escalares, é utilizado a integração em linguagem Python com o software Paraview® para acessar a estrutura de dados de acordo com localizações geométricas dos volumes das malhas. Também é utilizada a utilidade *wallHeatFlux* do OpenFOAM® para cálculo do fluxo de calor nas superfícies de interface entre fluido e bloco metálico.

Dessa maneira, a partir dos dados de temperatura, fluxo de calor e velocidade nos domínios de fluido são calculados, consoante Apêndice C, os seguintes parâmetros:

- Temperatura média do fluido a cada seção no eixo  $x$ ;
- Velocidade média ( $V_{med}$ ) ponderada pela vazão mássica a cada seção no eixo  $x$ ;
- Número de Nusselt médio local ( $\overline{Nu}_x$ ) a cada seção do eixo  $x$ ; e
- Número de Nusselt médio global ( $\overline{Nu}$ ) e coeficiente de transferência de calor por convecção médio global ( $\overline{h}$ ).

Além disso, a partir dos dados de temperatura nas regiões das células de bateria são processados:

- Temperatura máxima em cada célula de bateria ( $T_{max,c}$ );
- Temperatura máxima no conjunto de células de bateria ( $T_{max,b}$ );
- Temperatura média em cada célula de bateria ( $T_{med,c}$ );
- Máxima diferença de temperatura em cada célula de bateria ( $\Delta T_{max,c}$ );
- Máxima diferença de temperatura de uma célula considerando o conjunto ( $\Delta T_{max,b}$ );
- Desvio padrão das temperaturas por célula de bateria ( $\sigma_{T_c}$ ); e
- Distribuição do campo de temperaturas nas células de bateria ( $T_c$ ).

A fim de comparar aspectos fluidodinâmicos e térmicos entre dois sistemas de resfriamento líquido podem ser realizadas análises sobre: a área disponível para transferência de calor ( $A_f$ ), a razão entre  $A_f$  e o volume do duto ( $A_f/V_d$ ) e a performance térmica de um sistema de resfriamento em relação a outro ( $\eta$ ). O cálculo da performance térmica é dado através da Equação 35 (ATTARZADEH, ROVIRA e DUWIG, 2021) – em que  $\overline{Nu}_0$  é o número de Nusselt médio global para um sistema de referência e  $f$  é o fator de atrito de Fanning para um escoamento laminar dado pela Equação 36, consoante trabalhos de Attarzadeh, Rovira e Duwig (2021) e Kim (2021), sendo  $\Delta P$  é a perda de carga do duto de resfriamento.

$$\eta = \frac{\overline{Nu}}{\overline{Nu}_0} \left( \frac{f_0}{f} \right)^{0,3} \quad (35)$$

$$f = \Delta P \frac{2}{\rho V_{in,m}^2} \quad (36)$$

Por fim, é realizada a análise por DTFS (detalhada na Seção 2.7) da distribuição no eixo  $x$  de  $\overline{Nu}_x$  e  $V_{med}$  no duto central (D2) do BTMS baseado em SMTP a fim de estudar os números de onda dos sinais e seus comportamentos periódicos. Para tal, é utilizado o algoritmo FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*) da biblioteca SciPy (The SciPy community, 2023) de linguagem Python – o qual interpretará o sinal em  $x$  como um sinal periódico de comprimento de onda  $L_x$ , apesar de os sinais serem não-periódicos no espaço.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Estudo de qualidade de malha

Para o Estudo de Qualidade de Malha, são realizadas medições em cinco sondas dentro do domínio multirregião para os sistemas REF e SMTP:

- Temperatura na célula 1;
- Temperatura na célula 16; e
- Temperatura, componente  $x$  da velocidade ( $u$ ) e pressão no duto D1.

As localizações das sondas, as especificações das malhas utilizadas, os cálculos intermediários do método GCI (conforme Seção 2.6) e resultados finais são encontrados no Apêndice A.

Para os dois sistemas, os Índices de Convergência de Malha ficam abaixo de 1,0 % em relação às sondas de temperatura tanto da malha menos refinada para a intermediária quanto da malha intermediária para a malha mais refinada – sendo considerado um resultado satisfatório. Entretanto, os valores de  $GCI$ , para as sondas de pressão e velocidade na análise dos dois sistemas, são considerados altos na análise das malhas 2 e 3: acima de 8 % para velocidade e acima de 7 % para pressão.

Isso indica que a malha de índice 2, para os dois sistemas, ainda apresenta - em relação aos resultados de pressão e velocidade – uma incerteza numérica grande advinda da discretização do domínio de fluido. O contraste, portanto, com os baixos valores de  $GCI$  para as sondas de temperatura, evidenciam que se torna necessário uma malha mais refinada no domínio de fluido.

É por esse motivo que são escolhidas – para as análises de pós-processamento – as malhas de índice 1 para cada um dos sistemas uma vez que elas apresentam menores valores de incerteza associada à discretização do domínio de fluido. Nesse cenário, nos dois sistemas, o  $GCI$  associado à pressão fica abaixo de 5 %, enquanto que o Índice de Convergência de Malha associado à velocidade fica próximo de 6,1 %.

### 4.2 Análise geral dos sistemas

Os parâmetros de comparação geral entre os sistemas REF e SMTP são dispostos na Tabela 7. Observa-se, primeiramente, que o número de Reynolds é menor para a mesma vazão mássica uma vez que há uma redução de aproximadamente 70 % do diâmetro hidráulico. É evidenciado, também, o principal benefício geométrico das estruturas baseadas em superfícies mínimas triplamente periódicas: o aumento de  $A_f$ , representando um crescimento de mais de 150 %. Além disso, a razão área de superfície por volume de duto ( $A_f/V_d$ ) aumenta em mais de 225 % – o que é um aspecto positivo considerando possíveis preocupações de volume/massa do BTMS em contexto automotivo e o objetivo do sistema de resfriamento ser mais compacto.

Esse aumento de área para transferência de calor do bloco metálico para o fluido, por fim, intensifica a transferência de calor: o coeficiente de transferência de calor médio  $\bar{h}$  é mais de nove vezes maiores no sistema SMTP em relação ao REF para todos os dutos analisados. Porém, quando é analisado o número de Nusselt médio  $\overline{Nu}$  – o que torna a comparação de intensificação de transferência de calor por convecção mais adequada – o sistema com dutos baseado em superfícies mínimas periódicas apresenta, em média valores 3,09 maiores que o de referência. Isso é esperado uma vez que o diâmetro hidráulico é menor para o primeiro sistema.

Apesar de existir um aumento da transferência de calor, a perda de carga nos dutos com estruturas baseadas em aumenta em quase setenta vezes em relação aos dutos do sistema de referência. Esse comportamento é explicado a partir da caracterização que o escoamento tem no meio poroso, isto é, o fluido encontra maior dificuldade para escoar por espaços menores e caminhos mais tortuosos daqueles presentes em duto como aqueles do sistema REF.

Sob a perspectiva de temperaturas nas células da bateria, a temperatura máxima do conjunto de células é reduzida em mais de 2 K, porém a máxima diferença de temperatura no conjunto tem uma redução baixa (menos de 2 %). Isso mostra que a presença das estruturas baseadas em SMTP influencia na redução da temperatura máxima de uma célula de bateria, entretanto – dada a configuração comum entre os sistemas – não melhora significativamente a uniformidade de temperaturas na célula de bateria, um fator potencialmente ligado à disposição e quantidade de dutos no BTMS.

Tabela 7 - Comparação de parâmetros gerais entre sistemas REF e SMTP.

Item	Valor		Variação com base no Sistema de Referência
	Sistema de Referência	Sistema baseado em SMTP	
$Re [-]^5$	75	23,1	- 69,33 %
$\dot{m} [\text{kg/s}]$	$0,536 \times 10^{-3}$	$0,536 \times 10^{-3}$	-
$D [\text{m}]$	$8,000 \times 10^{-3}$	$2,457 \times 10^{-3}$	- 69,33 %
$A_f [\text{m}^2]$	$6,144 \times 10^{-3}$	$15,714 \times 10^{-3}$	+ 155,76 %
$A_f/V_d [\text{m}^{-1}]$	500	1628	+ 225,60 %
$\epsilon [-]$	-	0,7855	-
$\bar{h}_{D1} [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	513,4887	5.061,4097	+ 855,69 %
$\bar{h}_{D2} [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	512,4342	5.192,4706	+ 913,30 %
$\bar{h}_{D3} [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	510,3083	5.211,4915	+ 921,24 %
$\overline{Nu}_{D1} [-]$	6,7767	20,5150	+ 202,73 %
$\overline{Nu}_{D2} [-]$	6,7627	21,0462	+ 211,21 %
$\overline{Nu}_{D3} [-]$	6,7347	21,1233	+ 213,65 %
$\Delta P_{D2} [\text{Pa}]$	0,6928	48,2829	+ 6869,24 %
$\Delta P_{D2}/L_x [\text{Pa/m}]$	3,6083	251,4734	+ 6869,24 %
$T_{max,b} [\text{K}]$	304,02	301,97	- 2,05 K
$\Delta T_{max,b} [\text{K}]$	2,056	2,024	- 0,032 K
$K [\text{m}^2]$	-	$29,728 \times 10^{-9}$	-
$f [-]$	19,698	1372,819	+ 6869,24 %
$\eta_{D1}$	-	0,85	-
$\eta_{D2}$	-	0,87	-
$\eta_{D3}$	-	0,88	-

Fonte: o Autor.

Por fim, a performance térmica, em média, é de 0,86, ou seja, menor do que 1. Isso explicita que, mesmo que o sistema SMTP intensifique a transferência de calor por convecção e reduza a máxima temperatura no conjunto de células de bateria, a grande perda de carga associada ao seu duto torna esse sistema menos atraente no contexto energético global do BTMS. Dessa maneira, sob a perspectiva de análise do parâmetro  $\eta$ , existe um gasto energético adicional devido ao aumento de perda de carga que não induz um ganho significativo de transferência de calor da célula da bateria para o fluido.

Ainda assim, considerando o aspecto de aplicação do BTMS, o sistema SMTP permite que as células da bateria operem em uma condição térmica mais favorável. Dessa forma, cabe a uma decisão de projeto priorizar um menor gasto energético associado à operação de resfriamento do BTMS ou um processo de transferência de calor mais intenso, que por sua vez melhora outros aspectos de sistema de armazenamento de energia, como vida útil das células e potencial redução do risco de superaquecimento.

---

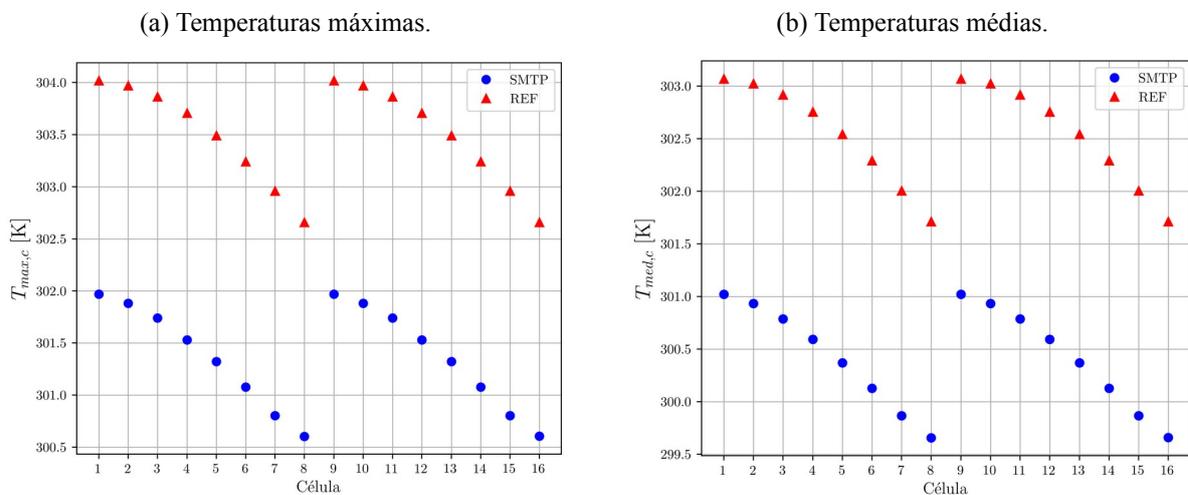
5 Baseado no diâmetro hidráulico dos dutos, conforme Seção 3.3.4.

### 4.3 Análise detalhada dos sistemas

#### 4.3.1 Campos de temperatura nas células de bateria

Existe uma caracterização simétrica em relação às temperaturas máximas e médias quando é comparada a fileira de células de bateria indexadas de 1 a 8 àquela com unidades indexadas de 9 a 16. Esse comportamento, observado nos sistemas REF e SMTP, é ilustrado na Figura 9. Além disso, as maiores temperaturas  $T_{max,c}$  e  $T_{med,c}$  ocorrem em células mais distantes da entrada do fluido nos dutos de resfriamento (células 1 e 9). A comparação entre sistemas permite observar uma redução acima de 2 K, tanto da temperatura máxima quanto da temperatura média, em todas as células de bateria no Sistema SMTP. As maiores ocorrências dessas reduções encontram-se nas células 5 e 13 (2,17 K).

Figura 9 - Temperaturas máximas e médias nas células.

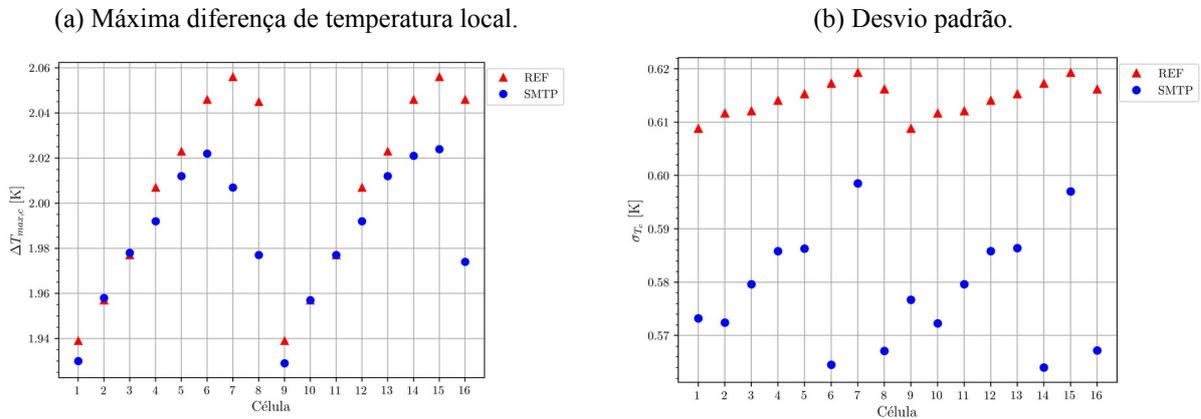


Fonte: o Autor

Ainda que haja uma redução de temperaturas máximas e médias na bateria devido ao sistema SMTP, a uniformidade das temperaturas não é necessariamente maior na totalidade desse sistema – conforme é explicitado na Figura 10. As duas células mais distantes da entrada do fluido nos dutos (células 1 e 9) são aquelas cujo o valor de  $\Delta T_{max}$  é menor no sistema REF. Percebe-se também que o efeito do duto baseado em SMTP na máxima diferença de temperatura, considerando o conjunto de baterias, é minimizado quando se distancia da entrada do fluido nos dutos (Figura 10(a)).

Esse comportamento fica evidente quando são analisadas as células mais próximas da entrada do fluido nos dutos, indexadas com os números 8 e 16, as diferenças máximas de temperatura tem uma redução de 3,52 % no sistema SMTP em relação ao REF. Por fim, a comparação dos valores de desvio padrão, ilustrada na Figura 10(b), indica que, no sistema que utiliza superfícies mínimas triplamente periódicas, as células de bateria apresentam uma menor variação interna de temperatura em relação a sua média, isto é, abaixo de 0,600 K em contraste aos valores acima de 0,608 K no Sistema REF.

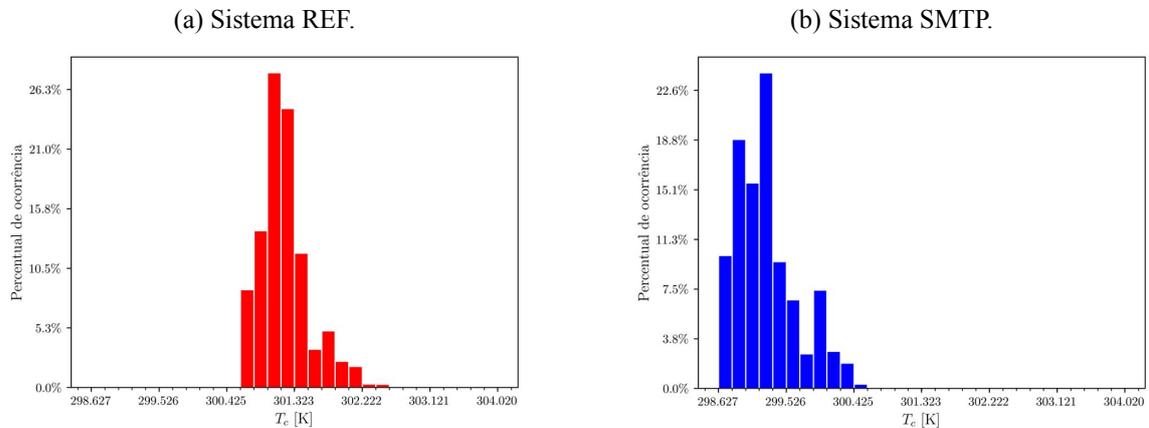
**Figura 10** - Máxima diferença de temperatura e desvio padrão do campo de temperaturas por célula de bateria.



Fonte: o Autor

Ainda no contexto de distribuição de temperaturas, no sistema de referência, a faixa de temperatura em que se observa o maior registro de temperaturas é localizada em regiões de maiores valores que no caso do sistema SMTP – conforme ilustração na Figura 11. Dessa maneira, destaca-se que as máximas temperaturas observadas no sistema baseado em superfícies mínimas triplamente periódicas são menores que as mínimas temperaturas no sistema de referência.

**Figura 11** - Histogramas de temperaturas para Célula 8.



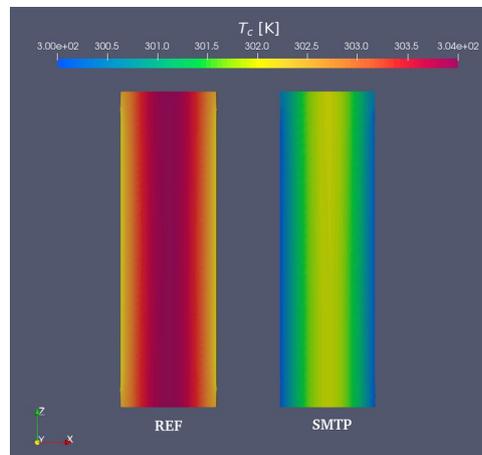
Fonte: o Autor.

Aliado a isso e observando uma distribuição de temperaturas com caracterização radial, conforme é ilustrado na Figura 12, as maiores concentrações de temperaturas ocorrendo à esquerda na faixa de temperaturas indica que o processo de transferência de calor no sistema SMTP tende a manter temperaturas mais baixas até uma distância radial maior do que o Sistema REF. É válido apontar que a caracterização radial de temperaturas nas células de bateria pode ser justificada a partir da grande diferença entre os valores de condutividade térmica avaliados nas direções radial e axial das células (especificados na Seção 3.1), isto é, a condutividade térmica radial sendo cerca de vinte vezes menor que a axial influencia em um processo de difusão do calor mais intenso no sentido radial que axial: gradiente de temperaturas é mais significativo no sentido radial que axial.

Portanto, a análise estatística acima evidencia uma caracterização térmica benéfica para as células de bateria devido à implementação das estruturas baseadas em SMTP no BTMS: ocorrência de menores valores de temperatura e menor variação interna das temperaturas considerando o parâmetro de desvio

padrão – podendo reduzir efeitos de redução de vida útil e capacidade da bateria ao longo de seu ciclo de utilização.

**Figura 12** - Distribuição radial de temperaturas na Célula 1 para sistemas REF e SMTP.

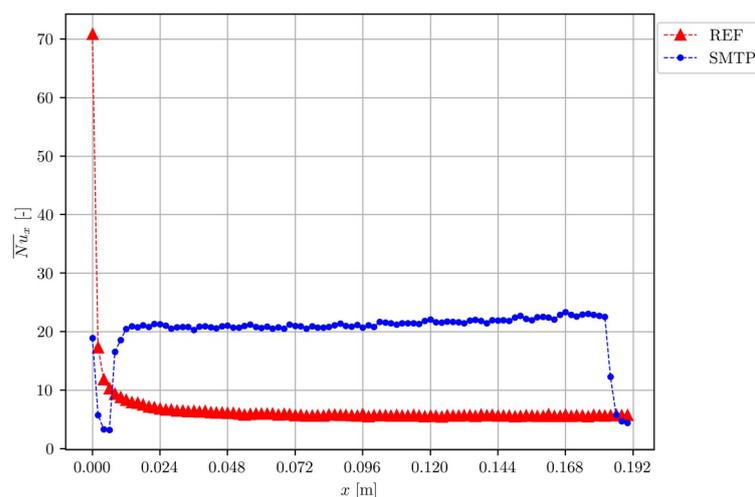


Fonte: o Autor. Reprodução: Paraview® (2023).

#### 4.3.2 Número de Nusselt médio e velocidade média

O comportamento da média do número de Nusselt a cada seção tomada por intervalos de 2 mm ao longo do eixo  $x$  no duto D2 é ilustrada na Figura 13. Observa-se, para o Sistema REF, o comportamento esperado para um escoamento laminar: altos valores perto da região de entrada do duto devido à grande diferença de temperatura entre parede e fluido (início do desenvolvimento da camada limite térmica), porém uma redução de  $\overline{Nu}_x$  ao longo do eixo com uma aproximação assintótica.

**Figura 13** - Número de Nusselt médio avaliado em seções ao longo do eixo  $x$  para Duto D2.



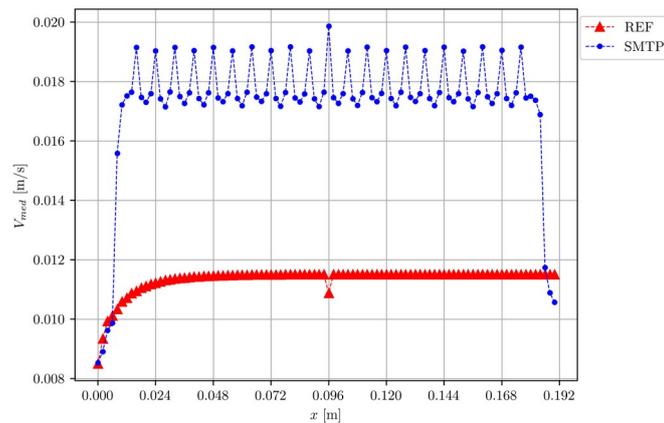
Fonte: o Autor.

Por outro lado, por mais que o duto do sistema SMTP apresente o mesmo comportamento na região de entrada – o que é esperado devido a essa região ser idêntica a do duto do sistema REF – existe um crescimento do número de Nusselt médio a partir de  $x = 8$  mm. Esse ponto marca o começo da primeira unidade fundamental de fluido (baseada em SMTP). Além disso, destaca-se o leve crescimento de  $\overline{Nu}_x$  ao longo do eixo  $x$ , o que não é observado no sistema de referência.

O comportamento descrito anteriormente pode ser explicado devido ao fato do escoamento recuperar momentum de maneira periódica ao longo do intervalo  $8 \leq x \leq 184$  mm nos dutos do Sistema SMTP. Os efeitos advectivos no processo de transferência de calor por convecção são intensificados devido à manutenção de velocidades maiores ao longo do duto.

É evidenciado, na Figura 14, o fenômeno de recuperação de momentum, em que se observa a velocidade média  $V_{med}$  em seções tomadas por intervalos de 2 mm ao longo do eixo  $x$  no duto D2: enquanto que no duto do sistema REF, a velocidade média atinge um valor assintótico abaixo de 0,012 m/s, a velocidade média no duto do Sistema SMTP varia periodicamente, na maior parte do duto, entre 0,017 e 0,020 m/s. Além disso, existe um crescimento da velocidade média justamente a partir de  $x = 8$  mm, coincidindo com o aumento do número de Nusselt (Figura 13).

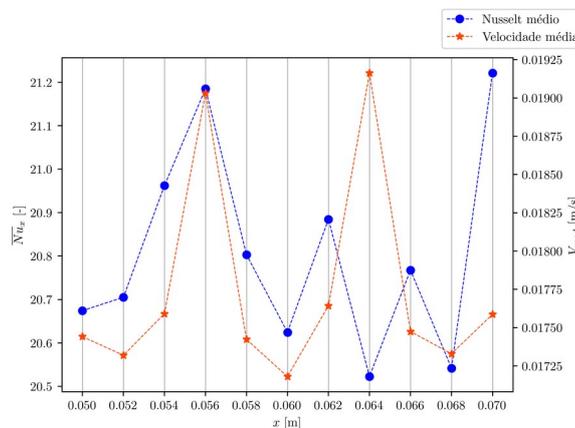
**Figura 14** - Média da Velocidade local avaliada em seções ao longo do eixo  $x$  para Duto D2.



Fonte: o Autor.

Essa dinâmica entre número de Nusselt médio e velocidade média do escoamento ao longo do eixo  $x$ , no sistema SMTP, é ilustrada mais detalhadamente na Figura 15. Observa-se que, no intervalo selecionado para a análise, a maioria dos intervalos em que  $\overline{Nu}_x$  cresce,  $V_{med}$  também aumenta – com exceção do ponto  $x = 64$  mm.

**Figura 15** - Número de Nusselt médio e média da velocidade ao longo de intervalo selecionado do eixo  $x$  para geometria baseada em SMTP para Duto D2.

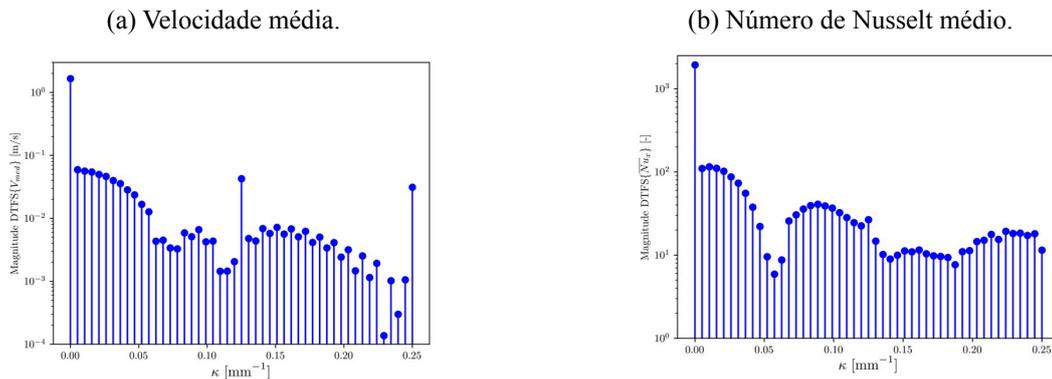


Fonte: o Autor.

Ainda que o comportamento periódico da velocidade média esteja correlacionado à melhoria no processo de transferência de calor por convecção, a análise dos números de onda – ilustrada na Figura 16 – indica que o benefício no padrão de escoamento nas estruturas baseadas em SMTP é subaproveitado pelo Sistema SMTP. Enquanto que a magnitude da DTFS da velocidade média apresenta altos valores

para números de onda com valores de  $0,125 \text{ mm}^{-1}$  e  $0,25 \text{ mm}^{-1}$  (correspondendo a comprimentos de onda de, respectivamente, 8 mm e 4 mm) no eixo  $x$  – não existe analogia para o número de Nusselt médio. Esse comportamento evidencia que a disponibilidade de um escoamento com propriedades periódicas não impacta o processo de transferência de calor com a mesma relevância.

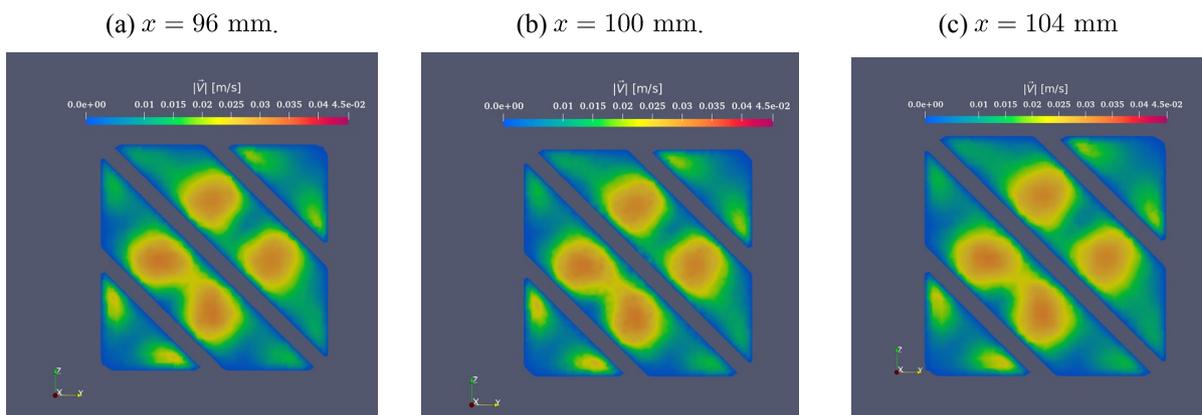
**Figura 16** - Análise dos números de onda da velocidade e do número de Nusselt médios locais em duto D2 do sistema SMTP.



Fonte: o Autor

A análise acima sugere que em comprimentos de onda de 4 mm e 8 mm existe um aumento significativo periódico da velocidade média – conforme ilustrado na Figura 17. Dito isso, a construção de um duto baseado em SMTP em que há a intercalação de uma unidade fundamental de SMTP e uma estrutura vazia (paralelepípedo como no duto do sistema de referência), pode preservar a periodicidade do aumento da velocidade média do fluido ao passo que a perda de carga potencialmente torna-se menor com a existência de caminhos mais livres para o escoamento.

**Figura 17** - Magnitude do vetor velocidade no domínio de fluido para seções do duto D2 do sistema SMTP.



Fonte: o Autor. Reprodução: Paraview® (2023).

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou, numericamente, um BTMS de resfriamento líquido baseado em do Tipo D de Schwarz. O estudo térmico de um BTMS permite uma maior compreensão a respeito da resposta do sistema em termos de resfriamento e/ou aquecimento das células de bateria de um veículo elétrico – os

quais consolidaram, nos últimos anos, sua relevância no contexto não só de mobilidade urbana e ambiental, como também energético.

O BTMS baseado em SMTP intensifica o processo de resfriamento das células de bateria em relação a um BTMS de referência, o qual não utiliza superfícies mínimas triplamente periódicas. O aumento da área de superfície destinada à transferência de calor entre fluido e domínio sólido justifica esse comportamento de transferência de calor. Entretanto, a perda de carga associada ao sistema SMTP é significativamente superior ao sistema de referência, o que leva a uma baixa performance térmica do primeiro tipo em relação ao segundo. Dessa maneira, o sistema baseado em SMTP não é favorável sob a perspectiva energética global do BTMS, uma vez que a melhoria no resfriamento não justifica o gasto de energia de operação associado ao aumento da perda de carga. Entretanto, é inevitável reconhecer a melhoria na operação térmica das células da bateria, caracterizando a utilização de um sistema SMTP como uma escolha entre: uma melhor capacidade de resfriamento e um menor gasto energético associado a isso.

A partir de uma análise detalhada e comparativa entre os sistemas REF e SMTP é possível observar que, em todas as células de bateria, ocorre a redução das temperaturas máxima e média, entretanto a diferença de temperatura máxima, para cada célula de bateria, não é reduzida de maneira relevante. Dessa maneira, o Sistema baseado em SMTP não melhora significativamente a uniformidade de temperatura nas células uma vez que concentra temperaturas mais baixas, não evitando temperaturas mais elevadas concentradas no centro das células cilíndricas. Também foi constatada a periodicidade da velocidade média do fluido ao longo do eixo  $x$ , o que permite a manutenção de valores mais altos de número de Nusselt no mesmo sentido axial.

Por fim, a contribuição deste trabalho reside na caracterização do fenômeno de transferência de calor por convecção em um BTMS de resfriamento líquido utilizando estruturas de duto baseadas do Tipo D de Schwarz – o que permite compreender as limitações dessa aplicação, além de possíveis melhorias no sistema SMTP. Nesse sentido, para futuros estudos, são sugeridos os seguintes tópicos:

- Simulações do sistema SMTP com duto construído a partir de outras superfícies mínimas triplamente periódicas, como Tipo P e Tipo G de Schwarz;
- Investigação sobre variações de parâmetros do ponto de operação do sistema SMTP, isto é, temperatura de entrada do fluido refrigerante e vazão mássica na entrada dos dutos;
- Estudo do comportamento térmico das células de bateria devido a modificações na geometria comum dos sistemas, como o número de dutos e posicionamentos desses no BTMS, além do diâmetro hidráulico e espaçamento entre as células;
- Avaliação de performance térmica de duto baseado em SMTP com menor número de estruturas baseadas em Superfícies Mínimas Periódicas; e
- Simulação do sistema SMTP para um modelo computacional ampliado (maior número de células de bateria).

## 6 REFERÊNCIAS

AL-KETAN, Oraib; ALI, Mohamed; KHALIL, Mohamad; et al. Forced Convection Computational Fluid Dynamics Analysis of Architected and Three-Dimensional Printable Heat Sinks Based on Triply Periodic Minimal Surfaces. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, v. 13, n. 2, p. 021010, 2021.

ASSIS, Matheus Mendes da Silva de. **PREVISÃO DO CUSTO E DO MATERIAL DE SUPORTE NA MANUFATURA ADITIVA DE POR MEIO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA. 2021. 88 f. Dissertação (Mestrado)** - Curso de Engenharia de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do ABC, Santo André, 2021. Disponível em: <https://biblioteca.ufabc.edu.br/index.html>. Acesso em: 01 fev. 2023.

ATTARZADEH, Reza; ROVIRA, Marc; DUWIG, Christophe. Design analysis of the “Schwartz D” based heat exchanger: A numerical study. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 177, p. 121415, 2021.

BANDHAUER, T. M.; GARIMELLA, S.; FULLER, T. F. A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 158, n. 3, p. R1, 2011.

CELIK, Ishmail B. et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of fluids Engineering-Transactions of the ASME**, v. 130, n. 7, 2008.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Heat and mass transfer: fundamentals & applications**. Fifth edition. New York, NY: McGraw Hill Education, 2015.

DENG, Yuanwang; FENG, Changling; E, Jiaqiang; et al. Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review. **Applied Thermal Engineering**, v. 142, p. 10–29, 2018.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **EEA greenhouse gases — data viewer**. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>. Acesso em: 27 jun. 2022.

EATON, J.W. **GNU Octave**. Version 7.1.0. 6 Abr. 2022. Disponível em <https://octave.org/news/release/2022/04/06/octave-7.1.0-released.html#:~:text=GNU%20Octave%207.1.0%20Released%20Apr%206%2C%202022%20GNU,Matlab%20and%20contains%20many%20new%20and%20improved%20functions.>>. Acesso em: 08/05/2022.

FAN, Zhaohui; GAO, Renjing; LIU, Shutian. A novel battery thermal management system based on P type triply periodic minimal surface. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 194, p. 123090, 2022

HAN, Taeyoung; KHALIGHI, Bahram; YEN, Erik C.; et al. Li-Ion Battery Pack Thermal Management: Liquid Versus Air Cooling. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, v. 11, n. 2, p. 021009, 2019.

HAYKIN, Simon. **Sinais e sistemas**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HE, Chuan; LI, Maode; WANG, Fengjuan; et al. Simulation study of a cylindrical battery module. **Journal of Energy Storage**, v. 48, p. 104000, 2022.

HU, Xiaosong; SUN, Fengchun; ZOU, Yuan. Comparison between two model-based algorithms for Li-ion battery SOC estimation in electric vehicles. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 34, p. 1–11, 2013.

IANNICIELLO, Lucia; BIWOLÉ, Pascal Henry; ACHARD, Patrick. Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials. **Journal of Power Sources**, v. 378, p. 383–403, 2018.

INCROPERA, Frank P.; INCROPERA, Frank P. (Orgs.). **Fundamentals of heat and mass transfer**. 6th ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2020: Entering the decade of electric drive?** Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>>. Acesso em: 26 jun 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2022: Securing supplies for an electric future**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>>. Acesso em: 26 jun 2022.

JUNCU, Gheorghe. The influence of viscous dissipation on the unsteady conjugate forced convection heat transfer from a fluid sphere. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 90, p. 542–551, 2015.

KIM, Jaewan; OH, Jinwoo; LEE, Hoseong. Review on battery thermal management system for electric vehicles, **Applied Thermal Engineering**, v. 149, p. 192–212, 2018.

KIM, N.-H. Air-side heat transfer and pressure drop of the fin-and-tube heat exchangers having oval tubes under wet condition. **Heat and Mass Transfer**, v. 57, n. 10, p. 1633–1644, out. 2021.

KITWARE, **Paraview**. Version 5.1.0. 21 Jun. 2016. Disponível em: <<https://www.kitware.com/paraview-5-1-0-release-notes/>>. Acesso em: 30/08/2022.

LG. **Advanced Automotive Battery**. Disponível em: <<https://www.lgensol.com/en/business-automotive-battery>>. Acesso em: 15/04/2023.

LIANG, Gang; LI, Jian; HE, Junyi; et al. Numerical investigation on a unitization-based thermal management for cylindrical lithium-ion batteries. **Energy Reports**, v. 8, p. 4608–4621, 2022.

MALISKA, Clovis R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2004.

NIELD, Donald A.; BEJAN, Adrian. **Convection in porous media**. 3rd ed. New York: Springer, 2006.

ONU. **The Paris Agreement**. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>>. Acesso em: 28 jun. 2022.

PENG, Hao; GAO, Feng; HU, Wenjing. **Design, Modeling and Characterization on Triply Periodic Minimal Surface Heat Exchangers with Additive Manufacturing**. In: [s.l.]: University of Texas at Austin, 2019. Disponível em: <<https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/90564>>. Acesso em: 29 jan. 2023.

PORBITAL. **Plotdigitizer**. 2023. Disponível em: <<https://plotdigitizer.com/app>>. Acesso em: 15/10/2022.

RAO, Zhonghao; QIAN, Zhen; KUANG, Yong; et al. Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface. **Applied Thermal Engineering**, v.123, p. 1514–1522, 2017.

RAJAGOPALAN, S; ROBB, R. Schwarz meets Schwann: Design and fabrication of biomorphic and durataxic tissue engineering scaffolds. **Medical Image Analysis**, v. 10, n. 5, p. 693–712, 2006.

SAITO, Yoshiyasu; SHIKANO, Masahiro; KOBAYASHI, Hironori. Heat generation behavior during charging and discharging of lithium-ion batteries after long-time storage. **Journal of Power Sources**, v. 244, p. 294–299, 2013.

TANG, Wei; ZHOU, Hua; ZENG, Yun; et al. Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 201, p. 123642, 2023.

TAO, Hong-Ge; CHEN, Huan-Xin; XIE, Jun-Long; et al. An alternative approach to quantifying fluid flow uniformity based on area-weighted average velocity and mass-weighted average velocity. **Energy and Buildings**, v. 45, p. 116–123, 2012.

TETE, Pranjali R.; GUPTA, Mahendra M.; JOSHI, Sandeep S. Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: A technical review. **Journal of Energy Storage**, v. 35, p. 102255, 2021.

TETE, Pranjali R.; GUPTA, Mahendra M.; JOSHI, Sandeep S. Numerical investigation on thermal characteristics of a liquid-cooled lithium-ion battery pack with cylindrical cell casings and a square duct. **Journal of Energy Storage**, v. 48, p. 104041, 2022.

THAKUR, Amrit Kumar; PRABAKARAN, Rajendran; ELKADEEM, M.R.; et al. A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium-ion battery system of electric vehicles. **Journal of Energy Storage**, v. 32, p. 101771, 2020.

The Free and Open Source 3D Creation Suite. **Blender**. Version 3.4.0. 7 Dez. 2022. Disponível em: <<https://www.blender.org/download/releases/3-4/>>. Acesso em: 22/12/2022.

The OpenFOAM Foundation Ltd. **OpenFOAM**. Version 10. Jul 2022. Disponível em: <<https://openfoam.org/version/10/>>. Acesso em: 30/08/2022.

The SciPy community. **SciPy**. Version 1.10.1. 19 Fev. 2023. Disponível em: <[https://docs.scipy.org/doc/scipy/getting\\_started.html](https://docs.scipy.org/doc/scipy/getting_started.html)>. Acesso em: 20 Fev. 2023.

TOUSI, Mahdi; SARCHAMI, Amirhosein; KIANI, Mehrdad; et al. Numerical study of novel liquid-cooled thermal management system for cylindrical Li-ion battery packs under high discharge rate based on AgO nanofluid and copper sheath. **Journal of Energy Storage**, v. 41, p. 102910, 2021.

WANG, Haitao; TAO, Tao; XU, Jun; et al. Cooling capacity of a novel modular liquid-cooled battery thermal management system for cylindrical lithium ion batteries. **Applied Thermal Engineering**, v. 178, p. 115591, 2020.

WANG, Haimin; WANG, Yufei; HU, Feng; et al. Heat generation measurement and thermal management with phase change material based on heat flux for high specific energy power battery. **Applied Thermal Engineering**, v. 194, p. 117053, 2021.

WOOD, Brian D.; HE, Xiaoliang; APTE, Sourabh V. Modeling Turbulent Flows in Porous Media. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 52, n. 1, p. 171–203, 2020.

XIA, Guodong; CAO, Lei; BI, Guanglong. A review on battery thermal management in electric vehicle application. **Journal of Power Sources**, v. 367, p. 90–105, 2017.

YUE, Q.L.; HE, C.X.; WU, M.C.; et al. Pack-level modeling of a liquid cooling system for power batteries in electric vehicles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 192, p. 122946, 2022.

## APÊNDICE A – Estudo de Qualidade de Malha

**Quadro A.1** – Localização das sondas de monitoramento de variáveis para Estudo de Qualidade de Malha.

Região monitorada	Variável Monitorada	Localização no domínio físico		
		x (mm)	y (mm)	z (mm)
Célula 1	Temperatura	178,25	-10,75	0,00
Célula 16	Temperatura	13,75	10,75	0,00
Duto D1	Temperatura	37,25	0,00	12,00
	Componente em x da velocidade	37,25	0,00	12,00
	Pressão	154,75	0,00	12,00

Fonte: o Autor.

**Tabela A.1** - Especificações de configurações de malha.

Sistema	Índice da malha	Tamanho base de volume [m]	Refinamento de superfície			
			Célula de bateria		Duto	
			Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Referência	1	$2,80 \times 10^{-3}$	1	2	2	3
	2	$2,20 \times 10^{-3}$	2	2	2	3
	3	$1,60 \times 10^{-3}$	2	2	3	3
Baseado em SMTP	1	$3,15 \times 10^{-3}$	0	0	1	3
	2	$3,00 \times 10^{-3}$	2	2	3	4
	3	$2,20 \times 10^{-3}$	1	2	3	4

Fonte: o Autor.

**Tabela A.2** - Cálculos iniciais de estudo de qualidade de malha.

Parâmetro	Sistema de Referência		Sistema Baseado em SMTP	
	Domínio inteiro	Domínio de fluido	Domínio inteiro	Domínio de fluido
$N_1$	1.933.480	386.880	4.687.228	1.539.789
$N_2$	559.192	77.952	2.382.486	752.545
$N_3$	199.808	31.552	467.619	137.000
$\delta_1$ [m]	$0,491 \times 10^{-3}$	$0,317 \times 10^{-3}$	$0,361 \times 10^{-3}$	$0,184 \times 10^{-3}$
$\delta_2$ [m]	$0,743 \times 10^{-3}$	$0,540 \times 10^{-3}$	$0,453 \times 10^{-3}$	$0,234 \times 10^{-3}$
$\delta_3$ [m]	$1,047 \times 10^{-3}$	$0,730 \times 10^{-3}$	$0,780 \times 10^{-3}$	$0,413 \times 10^{-3}$
$r_{(2,1)}$	1,512	1,705	1,253	1,269
$r_{(3,2)}$	1,408	1,351	1,722	1,768

Fonte: o Autor.

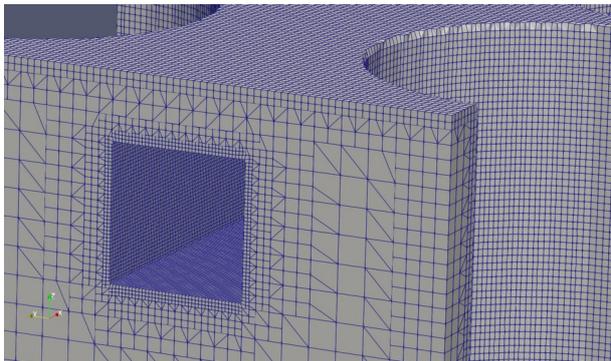
**Tabela A.3** - Resultados do Estudo de Qualidade de Malha para Sistema de Referência.

Item	Parâmetros									
	Sistema de Referência					Sistema baseado em SMTP				
	$T_{c1}$	$T_{c16}$	$T_{d1}$	$u_{D1}$	$p_{d1}$	$T_{c1}$	$T_{c16}$	$T_{d1}$	$u_{D1}$	$p_{d1}$
$f_1$	303,458	302,097	298,004	0,0148	0,1977	301,371	300,008	298,236	0,0274	13,9745
$f_2$	303,642	302,141	298,012	0,0144	0,1948	301,463	300,033	298,248	0,0266	13,6662
$f_3$	303,861	302,324	298,016	0,0143	0,1966	301,684	300,091	298,227	0,0236	11,3318
$\varepsilon_{(2,1)}$	0,184	0,044	0,008	-0,0004	-0,0029	0,092	0,025	0,012	-0,0008	-0,3083
$\varepsilon_{(3,2)}$	0,219	0,183	0,004	-0,0002	0,0017	0,221	0,058	-0,021	-0,0030	-2,3344
$s_g$	1,000	1,000	1,000	1,0000	-1,0000	1,000	1,000	-1,000	1,0000	1,0000
$p_g$	0,830	3,641	0,800	0,6883	0,5833	1,562	0,066	1,588	1,7796	4,3610
$\lambda_g$	0,219	0,346	0,218	1,0183	0,1122	-0,908	-0,825	-0,152	-0,9250	-0,9250
$f_{ext(2,1)}$	303,009	302,084	297,984	0,0155	0,2049	301,185	298,549	298,212	0,0287	14,1285
$f_{ext(3,2)}$	302,976	302,067	297,999	0,0154	0,1832	301,283	298,348	298,265	0,0285	13,9061
$e_{a(2,1)}$	0,061%	0,015%	0,003%	2,400%	1,454%	0,031%	0,008%	0,004%	2,760%	2,206%
$e_{a(3,2)}$	0,072%	0,061%	0,001%	1,160%	0,887%	0,073%	0,019%	0,007%	11,211%	17,082%
$e_{ext(2,1)}$	0,148%	0,004%	0,007%	4,898%	3,617%	0,062%	0,486%	0,008%	4,875%	1,102%
$e_{ext(3,2)}$	0,219%	0,024%	0,004%	6,551%	5,988%	0,060%	0,562%	0,006%	6,863%	1,756%
$GCI_{(2,1)}$	0,185%	0,005%	0,009%	6,122%	4,521%	0,077%	0,608%	0,010%	6,094%	1,377%
$GCI_{(3,2)}$	0,274%	0,031%	0,005%	8,189%	7,484%	0,075%	0,702%	0,007%	8,579%	2,195%

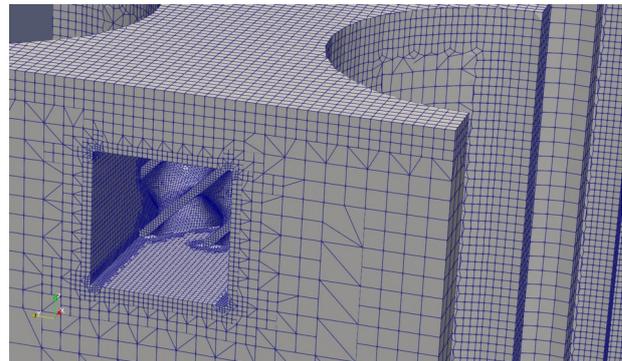
Fonte: o Autor.

**Figura A.1** – Detalhe da malha para região de bloco metálico (malhas computacionais de índice 1).

(a) Sistema de Referência.



(b) Sistema SMTP.



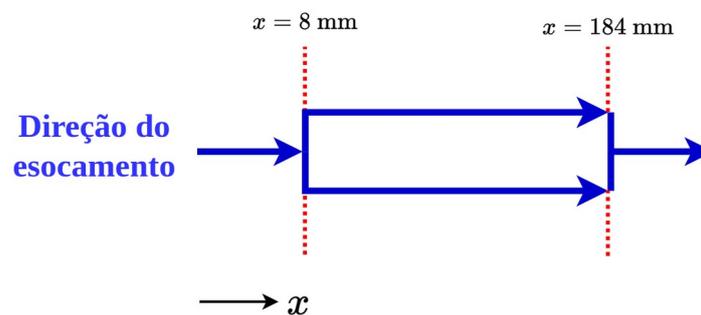
Fonte: o Autor. Reprodução: Paraview® (2023).

## APÊNDICE B – Padrão de Escoamento no Sistema SMTP

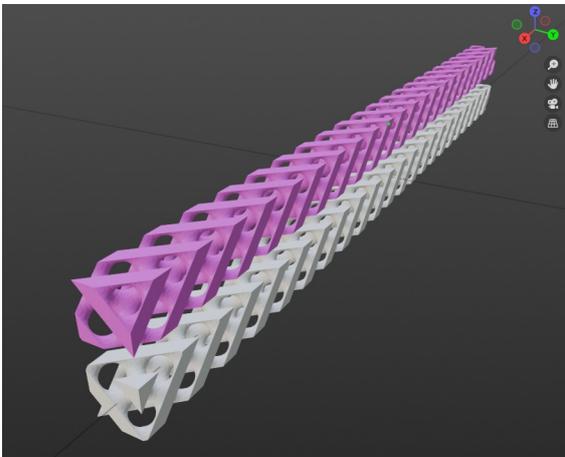
Conforme abordado na Seção 2.2, uma estrutura baseada em SMTP divide o espaço em duas sub-regiões. No caso do duto construído a partir dessa estrutura, existe um padrão de escoamento em paralelo esquematizado na Figura B.1 o qual é iniciado a partir do primeiro domínio fundamental de fluido. Dessa maneira, é possível visualizar a formação desses canais paralelos, desconsiderando as seções de paralelepípedo do fluido, nas Figuras B.1(b) e B.1(c).

**Figura B.1** - Detalhamento do padrão de escoamento no duto baseado em SMTP.

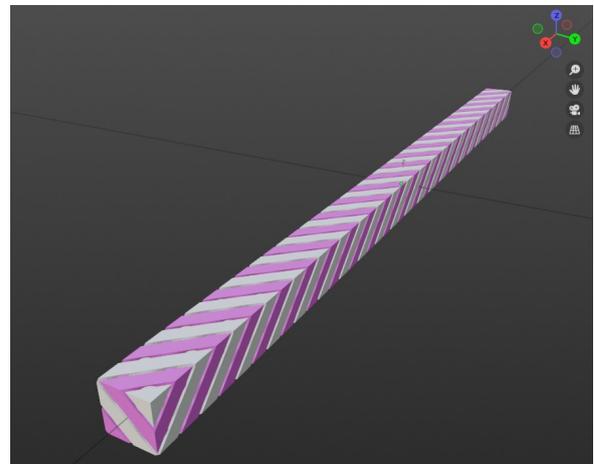
(a) Esquema do padrão de escoamento.



(b) Visão explodida dos canais em paralelo.



(c) Composição dos canais em paralelo.



Fonte: o Autor. Reprodução: Blender® (2023).

## APÊNDICE C – Parâmetros do fenômeno de transferência de calor por convecção forçada

A parametrização do fenômeno de transferência de calor por convecção forçada em escoamentos internos (dutos e microcanais, por exemplo) concentra grande significado físico do fenômeno e auxilia, dessa forma, o estudo dos comportamentos térmico e fluidodinâmico desses sistemas. Os principais parâmetros são expressos nas Equações C.1, C.2, C.3 e C.4 (INCROPERA, 2007) - as quais definem, respectivamente, o número de Reynolds representativo do escoamento para um comprimento característico  $D$ , o coeficiente local de transferência de calor, a temperatura média em uma seção localizada em uma distância genérica no eixo parametrizado  $\xi_a$  e o número de Nusselt local. São exemplificadas na Figura C.1, para um espaço vetorial  $\vec{\xi} = \langle \xi_a, \xi_b, \xi_c \rangle$ , as grandezas envolvidas para um

exemplo de duto cilíndrico – em que  $q''(\vec{\xi})$  é o fluxo de calor local na parede do duto,  $A_{\xi_a}$  e  $\vec{V}_{\xi_a}$  são, respectivamente, a área de seção transversal e o campo de velocidades avaliados em uma determinada posição no eixo  $\xi_a$  e  $\mathbf{n}$  é o vetor unitário normal da área  $A_{\xi_a}$ .

$$Re = \frac{\rho V_{in,med} D}{\mu} \quad (C.1)$$

$$h(\vec{\xi}) = \frac{q''(\vec{\xi})}{T_s(\vec{\xi}) - T_m(\xi_a)} \quad (C.2)$$

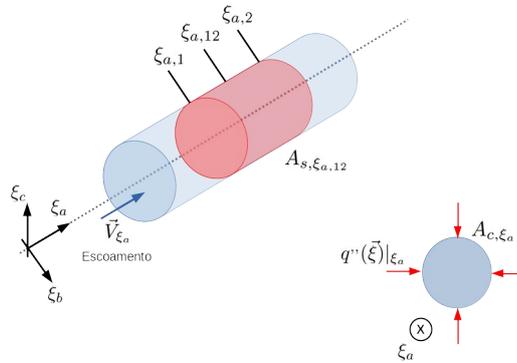
$$T_m(\xi_a) = \left[ \frac{1}{\dot{m} C_p} \int_A (\rho C_p) T(\vec{V} \cdot \mathbf{n}) dA \right] \Big|_{\xi_a} \quad (C.3)$$

$$Nu(\xi_a) = \frac{h(\xi_a) D}{k_f} \quad (C.4)$$

A velocidade média ponderada pela vazão mássica do fluido avaliada na posição genérica  $\xi$  pode ser calculada conforme Equação C.5 (Tao et al., 2012). Dessa maneira, a velocidade média na entrada de um duto ( $V_{in,med}$ ) pode ser calculada a partir da Equação C.5 desde que  $\xi_a = \xi_{in}$ , sendo  $\xi_{in}$  a posição da entrada do escoamento no duto no eixo parametrizado  $\xi_a$ .

$$V_{med}(\xi_a) = \frac{\int_A \rho(\vec{V} \cdot \mathbf{n})^2 dA}{\int_{A_c} \rho(\vec{V} \cdot \mathbf{n}) dA} \Big|_{\xi_a} \quad (C.5)$$

**Figura C.1** - Esquematização de Transferência de Calor por Convecção em Duto Cilíndrico.



Fonte: o Autor.

Também é comum o cálculo da média dos parâmetros  $h$  e  $Nu$ . Considerando uma seção qualquer do duto da C.1, entre as posições  $\xi_{a,1}$  e  $\xi_{a,2}$ , com área de superfície de  $A_{s,\xi_{a,1,2}}$ , o coeficiente de transferência de calor médio para essa seção e o respectivo número de Nusselt são dados, respectivamente, pelas Equações C.6 e C.7.

$$\bar{h}_{\xi_{a,1,2}} = \frac{1}{A_{s,\xi_{a,1,2}}} \int_{A_{s,\xi_{a,1,2}}} h dA_{s,\xi_{a,1,2}} \quad (C.6)$$

$$\overline{Nu}_{\xi_{a,1,2}} = \frac{\bar{h}_{\xi_{a,1,2}} D}{k_f} \quad (C.7)$$