



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

JOSÉ CLEITON FAUSTINO DA SILVA

**ANÁLISE TÉRMICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE
ARREFECIMENTO DE UM VEÍCULO FÓRMULA SAE ELÉTRICO**

JOÃO PESSOA – PB

2025

JOSÉ CLEITON FAUSTINO DA SILVA

**ANÁLISE TÉRMICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE
ARREFECIMENTO DE UM VEÍCULO FÓRMULA SAE ELÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Coordenação do curso
Engenharia Química da Universidade
Federal da Paraíba, como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Giovanilton
Ferreira da Silva

JOÃO PESSOA – PB

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586a Silva, Jose Cleiton Faustino da.
Análise Térmica e Simulação Computacional do Sistema
de Arrefecimento de Um Veículo Fórmula SAE Elétrico /
Jose Cleiton Faustino da Silva. - João Pessoa, 2025.
63 f. : il.

Orientação: Giovanilton Silva.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Arrefecimento, Transferência de Calor, Fluidos.
I. Silva, Giovanilton. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 66.01(043.2)

JOSÉ CLEITON FAUSTINO DA SILVA

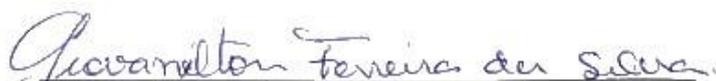
ANÁLISE TÉRMICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE
ARREFECIMENTO DE UM VEÍCULO FÓRMULA SAE ELÉTRICO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Coordenação do curso
Engenharia Química da Universidade
Federal da Paraíba, como requisito
parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr.
Giovanilton Ferreira da Silva

Aprovado em 11 de abril de 2025.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Giovanilton Ferreira da Silva – Orientador DEQ - Centro de Tecnologia -
Universidade Federal da Paraíba



Prof. Dr. Gerano Zenaide Clericuzi - Examinador DEQ - Centro de Tecnologia -
Universidade Federal da Paraíba



Prof. Dr. Veruscka Araújo Silva - Examinadora DEQ - Centro de Tecnologia -
Universidade Federal da Paraíba

“Qualidade sem resultados é inútil. Resultados sem qualidade é entediante.”

Johan Crujff

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado disposição, inspiração e motivação pra seguir no curso nos momentos difíceis e por ter me ajudado a superar todos os desafios que tive nessa longa caminhada.

Aos meus pais, Maria Joselita e Antônio, por terem me motivado e me dado total apoio na minha jornada acadêmica.

Aos meus irmãos, Talita, Toni, David, Cristiane e Diego, por estarem sempre presentes me apoiando.

Ao professor Giovanilton por ter me orientado. Sua paciência, sabedoria e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse concluir este trabalho.

Aos professores e colegas do curso de Engenharia Química, pelos momentos compartilhados ao longo da graduação, que enriqueceram minha formação acadêmica.

Aos colegas de curso da UFPB, por toda a ajuda que ofereceram ao longo da minha caminhada no curso de engenharia química.

Aos meus amigos do Fórmula E-motion, por terem proporcionado novos aprendizados e momentos únicos.

Por fim, agradeço a todos os amigos e familiares por terem me dado força e motivação para nunca desistir dos meus objetivos, sendo pilares importantes no meu caminho até a conclusão deste curso.

RESUMO

O sistema de arrefecimento desempenha um papel fundamental no desempenho e na confiabilidade de veículos elétricos de competição, garantindo a manutenção da temperatura ideal de operação dos componentes de potência, como motor e inversor. Neste trabalho, apresenta-se o projeto e a simulação de um sistema de arrefecimento para um veículo Fórmula SAE elétrico, considerando a integração de reservatório, bomba, mangueiras, trocador de calor e circuito de resfriamento. Inicialmente, realizou-se uma revisão dos requisitos térmicos dos componentes do sistema de tração, definindo os parâmetros de dissipação de calor e a vazão necessária do fluido refrigerante. Em seguida, a modelagem computacional do sistema foi desenvolvida utilizando softwares de simulação térmica e fluidodinâmica, permitindo a análise do comportamento do fluido e da eficiência da transferência de calor sob diferentes condições operacionais. Os resultados obtidos possibilitaram a otimização do layout hidráulico e térmico do sistema, garantindo um desempenho mais eficiente e confiável. O estudo contribui para o aprimoramento da engenharia de sistemas térmicos em veículos de competição elétrica, fornecendo uma base para futuras melhorias no projeto.

Palavras-chave: Arrefecimento, Fórmula SAE Elétrico, Simulação Computacional, Transferência de Calor, Fluidos.

ABSTRACT

The cooling system plays a fundamental role in the performance and reliability of electric competition vehicles, ensuring the optimal operating temperature of power components such as the motor and inverter. This work presents the design and simulation of a cooling system for a Formula SAE electric vehicle, considering the integration of a reservoir, pump, hoses, heat exchanger, and cooling circuit. Initially, a review of the thermal requirements of the powertrain components was conducted, defining the heat dissipation parameters and the required coolant flow rate. Subsequently, computational modeling of the system was developed using thermal and fluid dynamics simulation software, allowing for an analysis of fluid behavior and heat transfer efficiency under different operating conditions. The results enabled the optimization of the hydraulic and thermal layout of the system, ensuring more efficient and reliable performance. This study contributes to the advancement of thermal system engineering in electric competition vehicles, providing a foundation for future design improvements.

Keywords: Cooling, Formula SAE Electric, Computational Simulation, Heat Transfer, Fluids.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Veículo formula SAE.....	16
Figura 2.2 – Troca de calor por condução	20
Figura 2.3 – Trocadores de calor tipo compacto, radiador.	31
Figura 3.4 – Reservatório.....	44
Figura 3.5 – Bomba submersa elétrica	45
Figura 3.6 – Mangueira e conexão	46
Figura 3.7 – Radiador	48
Figura 3.8 – Motor YASA 750R.....	49
Figura 3.9 – Inversor Sevcon	49
Figura 3.10 – Diagrama do sistema de arrefecimento	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados do reservatório	44
Tabela 3.2 – Dados da bomba	45
Tabela 3.3 – Dados do fluido de arrefecimento	48
Tabela 3.4 – Dados de calor dissipado pelo motor e inversor	50
Tabela 3.5 – Dados do cálculo de perda de carga	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1	– Simulação do nível do reservatório para uma vazão de 15L/min	53
Gráfico 4.2	– Simulação do nível do reservatório para uma vazão de 20L/min	54
Gráfico 4.3	– Simulação do nível do reservatório para uma vazão de 30L/min	54
Gráfico 4.4	– Simulação das temperaturas dos componentes com vazão á 15L/min..	56
Gráfico 4.5	– Simulação das temperaturas dos componentes com vazão á 20L/min..	57
Gráfico 4.6	– Simulação das temperaturas dos componentes com vazão á 30L/min..	58

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	MOTIVAÇÃO.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.3	A CATEGORIA FÓRMULA SAE ELÉTRICO.....	16
1.4	A EQUIPE FÓRMULA E-MOTION.....	16
2	REVISÃO TEÓRICA.....	18
2.1	TROCA DE CALOR.....	18
2.2	CONDUÇÃO.....	19
2.3	CONVECÇÃO.....	23
2.4	RADIAÇÃO TÉRMICA.....	26
2.5	BOMBAS ELÉTRICAS E PERDAS DE CARGA.....	28
2.5.1	Bombas Elétricas.....	28
2.5.2	Perda de Carga.....	29
2.6	Trocadores de Calor.....	30
2.6.1	Fundamentos dos Trocadores de Calor.....	31
2.6.2	Radiadores como Trocadores de Calor no Sistema de Arrefecimento	32
2.6.3	Fatores que Afetam a Eficiência do Radiador.....	33
2.7	Sistema de Arrefecimento em Motores Elétricos.....	34
2.7.1	Geração de Calor em Motores Elétricos.....	34
2.7.2	Métodos de Arrefecimento de Motores Elétricos.....	35
2.7.3	Arrefecimento Líquido em Motores da Fórmula SAE Elétrico.....	35
2.7.4	Materiais e Fluidos Utilizados no Arrefecimento.....	36
2.7.5	Impacto do Arrefecimento no Desempenho do Motor Elétrico.....	36
2.7.6	Dissipação de calor em componentes elétricos.....	37

2.7.7	Capacidade Térmica.....	37
2.8	Balanco de Massa	38
2.8.1	Balanco de Massa em Sistemas de Arrefecimento Líquido	39
2.8.2	Balanco de Massa em Sistemas de Arrefecimento a Ar.....	39
2.8.3	Modelagem Computacional do Balanco de Massa	40
2.9	Balanco de Energia	40
2.9.1	Formulação Matemática do Balanco de Energia	41
2.9.2	Aplicação do Balanco de Energia no Sistema de Arrefecimento de Veículos da Fórmula SAE.....	41
2.9.3	Balanco de Energia no Sistema de Arrefecimento Líquido	41
2.9.4	Balanco de Energia em Sistemas de Arrefecimento a Ar	42
2.9.5	Modelagem Computacional do Balanco de Energia	43
2.10	Matlab	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	Componentes do sistema	44
3.1.1	Reservatório	44
3.1.2	Bomba Submersa	45
3.1.3	Mangueiras e Conexões.....	45
3.1.4	Radiador	46
3.1.5	Fluido de Arrefecimento.....	48
3.1.6	Motor.....	49
3.1.7	Inversor.....	49
3.2	Cálculo de calor dissipado.....	50
3.3	Capacidade térmica do motor e inversor.....	50
3.3.1	Motor.....	51
3.3.2	Inversor.....	51
3.4	Cálculo da perda de carga	51

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Cálculo do Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) do trocador de calor (radiador)	52
4.2	Simulação do nível do reservatório.....	52
4.2.1	Simulação do nível do reservatório para uma vazão da bomba de 15L/min 53	
4.2.2	Simulação do nível do reservatório para uma vazão da bomba de 20L/min 53	
4.2.3	Simulação do nível do reservatório para uma vazão da bomba de 30L/min 54	
4.3	Simulações das temperaturas dos componentes	55
4.3.1	Simulação considerando a vazão da bomba em 15L/min:	55
4.3.2	Simulação considerando a vazão da bomba em 20L/min:	56
4.3.3	Simulação considerando a vazão da bomba em 30L/min:	57
5	CONCLUSÃO.....	58
6	SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS	59
7	REFERÊNCIAS	59

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A eficiência térmica dos sistemas de arrefecimento é um fator determinante no desempenho de veículos elétricos de competição, especialmente na Fórmula SAE Elétrico. O motor e o inversor são componentes essenciais para a tração do veículo, mas também são fontes significativas de calor durante a operação. O superaquecimento desses componentes pode comprometer a eficiência energética, reduzir a vida útil dos materiais e até mesmo causar falhas operacionais (HANSEN et al., 2021).

A necessidade de um sistema de arrefecimento eficiente e bem dimensionado se torna ainda mais crítica em competições, onde cada watt de potência dissipada inadequadamente pode impactar diretamente o desempenho em pista. Dessa forma, a análise e simulação do sistema de arrefecimento tornam-se ferramentas fundamentais para otimizar a dissipação térmica, garantindo maior confiabilidade e eficiência energética ao veículo. Estudos anteriores demonstram que a modelagem computacional permite prever o comportamento térmico do sistema antes da fabricação, reduzindo custos e aprimorando a tomada de decisões no projeto (SANTOS et al., 2021).

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar e simular o sistema de arrefecimento de um veículo Fórmula SAE Elétrico, com foco na dissipação térmica do motor e do inversor. Para isso, serão desenvolvidas modelagens computacionais que permitam prever a distribuição de temperatura nos componentes, a eficiência do trocador de calor e o impacto da vazão do fluido refrigerante.

Os objetivos específicos incluem:

- Revisar conceitos de transferência de calor e suas aplicações em sistemas automotivos;
- Caracterizar os principais componentes do sistema de arrefecimento, como reservatório, bomba, mangueiras, motor, inversor e trocador de calor;

- Implementar simulações computacionais para analisar a eficiência do sistema térmico;
- Comparar diferentes configurações do sistema de arrefecimento para avaliar seu desempenho em condições operacionais variadas;
- Fornecer recomendações para aprimoramento do sistema com base nos resultados obtidos.

1.3 A CATEGORIA FÓRMULA SAE ELÉTRICO

A Fórmula SAE Elétrico é uma competição universitária internacional voltada ao desenvolvimento de veículos elétricos de alto desempenho. Organizada pela Society of Automotive Engineers (SAE), a competição desafia estudantes a projetar, construir e competir com protótipos elétricos, incentivando a aplicação de conceitos de engenharia em um ambiente realista e desafiador (FSAE, 2023).

Dentre os principais critérios avaliados estão a eficiência energética, o desempenho dinâmico, a inovação tecnológica e a segurança do veículo. Os times participantes precisam considerar diversos aspectos do projeto, incluindo a aerodinâmica, a eletrônica embarcada e a gestão térmica dos componentes, sendo este último um fator crucial para a confiabilidade e competitividade da equipe.

A **Figura 1.1** mostra um veículo Formula Sae durante a competição internacional.

Figura 1.1 – Veículo formula SAE



Fonte: SAE Internacional (2024)

1.4 A EQUIPE FÓRMULA E-MOTION

A Fórmula E-Motion é uma equipe universitária que participa da competição Fórmula SAE Elétrico, composta por estudantes de diversas engenharias. Seu principal objetivo é desenvolver um protótipo competitivo, aplicando conhecimentos adquiridos ao longo da graduação para solucionar desafios reais da indústria automotiva elétrica.

A equipe busca constantemente aprimorar seus projetos por meio de pesquisas, simulações e testes experimentais. Dentro desse contexto, a otimização do sistema de arrefecimento do veículo se tornou um dos focos principais do desenvolvimento, visando garantir o melhor desempenho térmico do motor e do inversor. A presente pesquisa se insere nesse cenário, contribuindo para a evolução da equipe e para o aprimoramento das tecnologias empregadas no veículo.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 TROCA DE CALOR

A troca de calor é um fenômeno fundamental para a análise térmica do sistema de arrefecimento do veículo Fórmula SAE Elétrico. Os três principais mecanismos de transferência de calor são a condução, a convecção e a radiação (INCROPERA et al., 2017).

Desde a antiguidade, o homem observou que diferentes materiais possuíam a capacidade de reter ou dissipar calor de maneiras distintas, o que levou ao desenvolvimento de tecnologias rudimentares para controle térmico. No entanto, foi apenas com o desenvolvimento da termodinâmica e da mecânica dos fluidos que a compreensão da troca de calor passou a se basear em princípios científicos sólidos.

Até o século XVIII, a natureza do calor ainda era amplamente debatida, e uma das primeiras hipóteses amplamente aceitas foi a teoria do calórico, proposta por Antoine Lavoisier e Pierre-Simon Laplace em 1778. Segundo essa teoria, o calor seria um fluido imponderável que se movia entre os corpos, explicando a transferência térmica observada experimentalmente (Brown, 1950). Essa concepção predominou até que Benjamin Thompson, também conhecido como Conde de Rumford, desafiou a ideia ao demonstrar, em 1798, que o calor poderia ser gerado indefinidamente pelo atrito, sugerindo que se tratava de uma forma de energia e não de um fluido material (Thompson, 1798).

No início do século XIX, Joseph Fourier estabeleceu a base matemática para o estudo da condução térmica ao formular a equação que descreve a propagação do calor em sólidos. Sua obra, *Théorie analytique de la chaleur*, publicada em 1822, introduziu o conceito de fluxo de calor e condução térmica, permitindo o desenvolvimento de métodos quantitativos para a análise de processos térmicos em materiais diversos (Fourier, 1822). Em paralelo, Jean-Baptiste Biot realizou estudos sobre a convecção térmica e formulou, em 1804, um dos primeiros modelos matemáticos para descrever a troca de calor entre superfícies sólidas e fluidos em movimento (Biot, 1804).

A teoria cinética dos gases, proposta no século XIX por James Clerk Maxwell e Ludwig Boltzmann, trouxe uma compreensão mais detalhada dos processos microscópicos envolvidos na troca de calor, explicando como a energia térmica se distribui entre as partículas de um sistema. Maxwell, em 1860, desenvolveu a distribuição de velocidades moleculares, enquanto Boltzmann, em 1872, formulou a equação que descreve a evolução temporal da

distribuição de energia em um gás, consolidando a ligação entre mecânica estatística e termodinâmica (Maxwell, 1860; Boltzmann, 1872).

A radiação térmica, outro mecanismo fundamental de troca de calor, foi estudada intensivamente no final do século XIX e início do século XX. Josef Stefan, em 1879, e Ludwig Boltzmann, em 1884, derivaram a Lei de Stefan-Boltzmann, que estabelece a relação entre a energia irradiada por um corpo negro e sua temperatura absoluta elevada à quarta potência (Stefan, 1879; Boltzmann, 1884). Mais tarde, Max Planck formulou a teoria quântica da radiação térmica, introduzindo a ideia de quantização da energia e explicando o espectro de emissão de corpos negros, um marco que deu origem à física quântica (Planck, 1900).

Os avanços da termodinâmica e da transferência de calor ao longo do século XX permitiram o desenvolvimento de diversas tecnologias de arrefecimento aplicadas na indústria automotiva, aeroespacial e eletrônica. Em veículos elétricos, como os utilizados na Fórmula SAE, a eficiência da troca de calor é crucial para manter a temperatura dos componentes eletrônicos e motores dentro de limites seguros, evitando perdas de desempenho e falhas prematuras. O projeto de sistemas de arrefecimento envolve a aplicação de equações de condução, convecção e radiação, além da otimização de trocadores de calor, como radiadores e dissipadores térmicos.

A evolução contínua dos estudos sobre troca de calor tem impulsionado inovações em diversas áreas da engenharia, permitindo o desenvolvimento de materiais avançados, fluidos térmicos de alta eficiência e sistemas de controle térmico inteligentes. Com o avanço das técnicas de simulação computacional e análise experimental, novos desafios na área de transferência de calor podem ser enfrentados com maior precisão, garantindo soluções mais eficazes para aplicações cada vez mais exigentes e sofisticadas.

2.2 CONDUÇÃO

A condução térmica é um dos principais mecanismos de transferência de calor e ocorre devido à propagação da energia térmica dentro de um meio sólido, líquido ou gasoso, sem que haja o transporte macroscópico de matéria. Esse fenômeno é resultado do movimento das moléculas, átomos e elétrons, que transferem energia uns para os outros à medida que vibram ou colidem. A condução térmica tem sido objeto de estudo desde os primórdios da ciência térmica e desempenha um papel crucial em diversas aplicações industriais, incluindo a engenharia automotiva, aeroespacial e eletrônica.

Desde a antiguidade, o homem percebeu que certos materiais conduziam melhor o calor do que outros, levando à distinção empírica entre bons e maus condutores térmicos. No entanto, a explicação teórica da condução começou a ganhar forma somente no século XIX. Joseph Fourier, em 1822, publicou sua obra *Théorie Analytique de la Chaleur*, na qual formulou a equação fundamental da condução térmica. A Lei de Fourier, como ficou conhecida, estabelece que a taxa de fluxo de calor através de um material é proporcional ao gradiente de temperatura e à condutividade térmica do meio (Fourier, 1822). Matematicamente, a equação diferencial unidimensional da condução estacionária é expressa por:

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

onde:

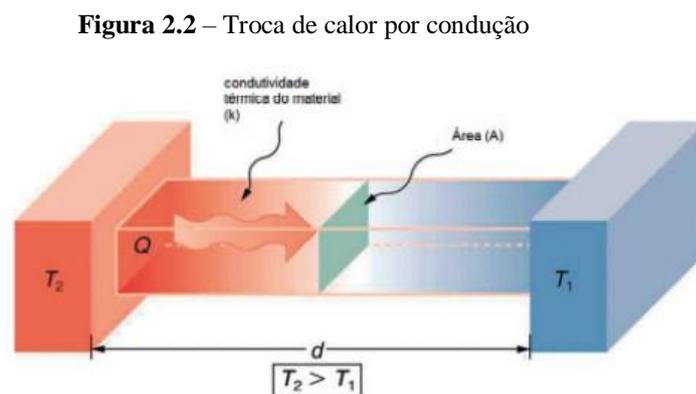
q é a taxa de fluxo de calor (W),

k é a condutividade térmica do material (W/m·K),

A é a área da seção transversal através da qual ocorre a condução (m²),

dT/dx é o gradiente de temperatura na direção da transferência de calor.

A **Figura 2.2** – Troca de calor por condução como acontece a troca de calor por condução.



Fonte: PROMILITARES (2025)

A condutividade térmica (k) é uma propriedade física intrínseca de cada material e determina sua capacidade de conduzir calor. Metais como cobre e alumínio apresentam alta condutividade térmica devido à presença de elétrons livres que facilitam a transferência de

energia térmica. Em contrapartida, materiais como madeira, borracha e espuma têm baixa condutividade térmica e, por isso, são utilizados como isolantes térmicos.

No século XX, os estudos sobre condução térmica avançaram significativamente com o desenvolvimento da mecânica estatística e da teoria da estrutura cristalina. A teoria cinética dos gases, formulada por Ludwig Boltzmann, forneceu um modelo microscópico para a condução em gases, explicando como as colisões entre moléculas transferem energia térmica (Boltzmann, 1872). Já no caso dos sólidos, a condução térmica ocorre principalmente por meio das vibrações da rede cristalina (fônons) e da movimentação de elétrons livres, como demonstrado pela teoria da condução eletrônica de Sommerfeld e Debye no início do século XX (Sommerfeld, 1928; Debye, 1912).

A condução térmica pode ocorrer em diferentes regimes:

Condução estacionária: quando a temperatura em cada ponto do material não varia com o tempo. Esse é o caso típico de sistemas em equilíbrio térmico, como paredes de edificações expostas a temperaturas constantes.

Condução transiente: quando a temperatura varia com o tempo, exigindo a solução da equação de calor transiente. Esse tipo de condução ocorre, por exemplo, quando um componente eletrônico recém-ligado começa a aquecer até atingir um regime permanente.

A equação da difusão térmica ou equação do calor, que descreve a condução transiente, é dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \nabla^2 \cdot T \quad (2)$$

onde:

$\alpha = k/(\rho \cdot c_p)$ é a difusividade térmica do material (m^2/s),

ρ é a densidade do material (kg/m^3),

c_p é o calor específico a pressão constante ($J/kg \cdot K$).

No contexto dos veículos elétricos da Fórmula SAE, a condução térmica é fundamental para dissipar o calor gerado por motores, inversores e baterias. O calor produzido nos semicondutores dos inversores, por exemplo, precisa ser transferido para dissipadores metálicos

que facilitam sua remoção. Os dissipadores de calor são frequentemente feitos de alumínio devido à sua leveza e alta condutividade térmica, permitindo uma transferência rápida do calor para as aletas, onde posteriormente será removido por outros mecanismos térmicos (Peyroux et al., 2019).

A condução térmica também desempenha um papel crucial no gerenciamento térmico das baterias. Durante o funcionamento, as células das baterias de íons de lítio geram calor devido às reações eletroquímicas e à resistência interna. A falha na dissipação desse calor pode levar a um aumento de temperatura que compromete o desempenho e reduz a vida útil das células. Para evitar isso, os sistemas de arrefecimento por condução utilizam placas metálicas condutoras, geralmente de alumínio ou cobre, para distribuir uniformemente o calor gerado entre as células e facilitar sua remoção (Pesaran et al., 2013).

A resistência térmica de contato é outro fator relevante na condução térmica. Quando duas superfícies metálicas entram em contato, a presença de irregularidades microscópicas cria pequenas áreas de contato efetivo, dificultando a transferência de calor. Para minimizar essa resistência térmica, são utilizadas pastas térmicas ou interfaces térmicas, que preenchem as microfendas e melhoram a condutividade térmica entre os componentes (Çengel e Turner, 2016).

A eficiência da condução térmica nos sistemas de arrefecimento de veículos elétricos pode ser aprimorada com o uso de novos materiais e tecnologias. Os materiais compósitos de matriz metálica, que combinam metais com cerâmicas de alta condutividade térmica, têm sido explorados para dissipadores de calor mais eficientes. Além disso, o grafeno, um material com condutividade térmica excepcional ($k > 5000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), tem sido investigado para aplicação em dissipadores ultrafinos e em camadas térmicas para eletrônicos de potência (Choi et al., 1995).

As análises computacionais da condução térmica em veículos elétricos são frequentemente realizadas utilizando simulações por Elementos Finitos (FEA), permitindo prever a distribuição de temperatura nos componentes e otimizar a eficiência térmica dos dissipadores e baterias. Estudos recentes demonstram que a otimização do design das interfaces térmicas e do layout dos sistemas de resfriamento pode reduzir significativamente os picos de temperatura nos inversores e módulos de bateria, melhorando o desempenho e a durabilidade do sistema (Patil et al., 2021).

Dessa forma, a condução térmica é um fator determinante para o sucesso do gerenciamento térmico dos veículos elétricos da Fórmula SAE. A escolha de materiais adequados, a otimização do design dos dissipadores e o uso de novas tecnologias são aspectos

fundamentais para garantir que os componentes operem dentro das faixas ideais de temperatura, aumentando a confiabilidade e o desempenho do veículo durante as competições.

2.3 CONVECÇÃO

A convecção térmica é um dos principais mecanismos de transferência de calor e ocorre devido ao movimento macroscópico de fluidos, sejam eles líquidos ou gases. Diferente da condução, que acontece por meio da vibração molecular dentro de um meio sólido ou fluido em repouso, a convecção envolve o transporte de calor impulsionado pela movimentação das partículas do fluido, promovendo a redistribuição da energia térmica. Esse fenômeno tem um papel essencial nos sistemas de arrefecimento de veículos elétricos, como os da Fórmula SAE, onde a dissipação eficiente do calor gerado pelos motores, inversores e baterias é fundamental para evitar o superaquecimento e garantir o desempenho adequado dos componentes (Incropera et al., 2008).

A compreensão da convecção térmica remonta aos primórdios da ciência dos fluidos. No século XVIII, Isaac Newton formulou a Lei do Resfriamento de Newton, que estabelece uma relação entre a taxa de transferência de calor por convecção e a diferença de temperatura entre a superfície sólida e o fluido adjacente (Newton, 1701). Essa equação pode ser expressa como:

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_f) \quad (3)$$

onde:

q é a taxa de transferência de calor (W),

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),

A é a área da superfície onde ocorre a troca térmica (m^2),

T_s é a temperatura da superfície sólida (K),

T_f é a temperatura do fluido (K).

O coeficiente de convecção térmica h depende de diversos fatores, como a velocidade do fluido, sua viscosidade, sua condutividade térmica e a rugosidade da superfície sólida.

No século XIX, Jean-Baptiste Biot e Lord Rayleigh aprofundaram o estudo da convecção térmica, introduzindo conceitos matemáticos fundamentais para sua descrição. Biot desenvolveu um modelo para a convecção forçada e natural, enquanto Rayleigh formulou os princípios do escoamento convectivo, estabelecendo o número de Rayleigh (Ra), um parâmetro adimensional que caracteriza a convecção natural (Biot, 1804; Rayleigh, 1916).

A convecção térmica pode ser classificada em dois tipos principais:

Convecção Natural (ou Livre) – Ocorre quando o movimento do fluido é gerado pela diferença de densidade causada por gradientes de temperatura. Esse fenômeno pode ser observado na circulação atmosférica, na formação de correntes oceânicas e no resfriamento de superfícies expostas ao ambiente. O número de Grashof (Gr) é usado para quantificar a importância das forças de empuxo em relação às forças viscosas no fluido. A convecção natural ocorre, por exemplo, em dissipadores de calor passivos usados em eletrônicos.

Convecção Forçada – Ocorre quando um fluido é movimentado por ação externa, como ventiladores, bombas ou escoamento devido à passagem de um veículo. Esse tipo de convecção é amplamente empregado em sistemas de arrefecimento de motores, trocadores de calor e circuitos eletrônicos de alta potência. O número de Reynolds (Re) é um parâmetro fundamental para determinar o regime do escoamento, podendo ser laminar ($Re < 2300$) ou turbulento ($Re > 4000$). A convecção forçada é amplamente utilizada em radiadores de veículos elétricos, onde o fluxo de ar resfria o fluido de arrefecimento em circulação.

A eficiência da convecção térmica também é descrita pelo número de Nusselt (Nu), que representa a razão entre a transferência de calor por convecção e por condução no fluido:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \quad (4)$$

onde:

L é o comprimento característico da superfície (m),

k é a condutividade térmica do fluido (W/m·K).

A correlação entre os números adimensionais de Reynolds, Prandtl e Nusselt permite a formulação de equações empíricas para determinar o coeficiente de convecção em diferentes condições de escoamento.

No século XX, os estudos sobre convecção térmica avançaram significativamente com o desenvolvimento da mecânica dos fluidos e da termodinâmica. Theodore von Kármán

contribuiu com a teoria das camadas limite térmicas e hidrodinâmicas, fundamentais para entender a troca de calor entre superfícies sólidas e fluidos em movimento (von Kármán, 1921). Além disso, estudos experimentais e computacionais permitiram o desenvolvimento de modelos cada vez mais precisos para a previsão da transferência de calor em sistemas complexos.

A convecção térmica desempenha um papel essencial nos sistemas de arrefecimento de veículos elétricos. Em competições como a Fórmula SAE, a dissipação eficiente do calor gerado pelos motores elétricos e inversores é crucial para evitar o superaquecimento e garantir o máximo desempenho do veículo. Sistemas de arrefecimento por líquido utilizam trocadores de calor, onde a convecção forçada ocorre por meio do fluxo de um fluido refrigerante, que absorve o calor dos componentes e o dissipa para a atmosfera através de um radiador.

No contexto da Fórmula SAE Elétrica, a convecção forçada desempenha um papel crucial no arrefecimento do veículo. Os motores elétricos e inversores dissipam quantidades significativas de calor durante a operação, e a falha na dissipação eficiente pode comprometer a eficiência e a vida útil dos componentes. Para mitigar esse problema, são implementados sistemas de arrefecimento ativo que utilizam radiadores, bombas de circulação e ventiladores para otimizar a remoção de calor (Peyroux et al., 2019).

O sistema de arrefecimento de veículos elétricos da Fórmula SAE pode utilizar um radiador, no qual ocorre a convecção forçada do fluido refrigerante para absorver o calor dos componentes e transferi-lo para o ambiente. A eficiência desse processo pode ser aprimorada com a otimização do design das aletas do radiador, promovendo um escoamento turbulento do fluido refrigerante e aumentando a área de troca térmica (Kays e London, 1998).

Além disso, o fluxo de ar externo gerado pelo deslocamento do veículo contribui significativamente para a dissipação térmica, aumentando a taxa de convecção e reduzindo a temperatura do fluido de arrefecimento no radiador. Segundo Munson et al. (2013), a análise do comportamento do escoamento ao redor do veículo e dentro do sistema de arrefecimento pode ser feita utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), possibilitando otimizações na geometria dos dutos e na eficiência do resfriamento.

Outro aspecto relevante da convecção térmica em veículos elétricos é o resfriamento das baterias. Durante uma competição de Fórmula SAE, onde o sistema opera sob altas demandas de potência, a dissipação eficiente do calor gerado pelas células da bateria é essencial para evitar a degradação térmica e garantir um desempenho estável. Métodos como refrigeração líquida direta utilizam a combinação de condução e convecção para otimizar a remoção de

calor, garantindo temperaturas uniformes e aumentando a durabilidade do sistema (Pesaran et al., 2013).

Pesquisas recentes também têm explorado o uso de fluidos térmicos avançados para aumentar a eficiência da convecção. Os nanofluidos, compostos por nanopartículas dispersas em líquidos base, demonstraram melhorias na condutividade térmica e na troca térmica por convecção, tornando-se uma alternativa promissora para sistemas de arrefecimento de veículos elétricos (Choi et al., 1995).

Com a crescente busca por veículos elétricos de alto desempenho e a necessidade de otimização térmica em competições como a Fórmula SAE, o estudo da convecção térmica torna-se cada vez mais relevante. O avanço das simulações numéricas, a aplicação de novos materiais e a evolução no design dos sistemas de arrefecimento possibilitam o desenvolvimento de soluções mais eficientes, garantindo maior confiabilidade e competitividade nas provas (Patil et al., 2021).

Portanto, compreender a convecção térmica e suas aplicações no arrefecimento de veículos elétricos é essencial para o projeto de sistemas térmicos eficientes e inovadores. Esse conhecimento permite que motores, inversores e baterias operem dentro das faixas de temperatura ideais, maximizando o desempenho e a durabilidade do veículo em condições de alta exigência térmica.

2.4 RADIAÇÃO TÉRMICA

A radiação térmica é um dos três mecanismos fundamentais de transferência de calor e ocorre pela emissão de ondas eletromagnéticas por um corpo devido à sua temperatura. Diferente da condução e da convecção, a radiação não necessita de um meio material para se propagar, podendo ocorrer inclusive no vácuo. Esse fenômeno pode acontecer em sistemas de arrefecimento onde a dissipação de calor por contato direto ou pelo movimento de fluidos é limitada, como em superfícies expostas de motores, inversores e baterias de veículos elétricos da Fórmula SAE (Incropera et al., 2008).

O estudo da radiação térmica remonta ao século XIX, quando cientistas como Gustav Kirchhoff, Josef Stefan e Ludwig Boltzmann desenvolveram teorias fundamentais sobre a emissão e absorção de calor por corpos aquecidos. A Lei de Stefan-Boltzmann, por exemplo, estabelece que a potência radiada por um corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta (Boltzmann, 1884):

$$q = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot T^4 \quad (5)$$

onde:

q é a taxa de transferência de calor por radiação (W),

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann,

ϵ é a emissividade do material (variando de 0 a 1),

A é a área da superfície emissora (m^2),

T é a temperatura absoluta do corpo (K).

A emissividade (ϵ) é um parâmetro crucial na radiação térmica e depende da natureza da superfície do material. Superfícies altamente refletoras, como metais polidos, apresentam emissividades baixas ($\epsilon < 0.1$), enquanto superfícies escuras e rugosas, como óxidos metálicos ou tintas térmicas, possuem emissividades mais elevadas ($\epsilon > 0.8$), o que aumenta a capacidade do material de irradiar calor para o ambiente (Modest, 2013).

Nos sistemas de arrefecimento dos veículos elétricos da Fórmula SAE, a radiação térmica contribui para a dissipação de calor em diversas situações:

Dissipação de calor em superfícies expostas – Componentes como motores, inversores e carcaças de baterias emitem calor para o ambiente pela radiação térmica. A escolha de materiais com alta emissividade ou a aplicação de revestimentos térmicos pode aumentar a eficiência dessa dissipação (Çengel e Ghajar, 2012).

Troca de calor entre superfícies internas do sistema – Em espaços confinados dentro do veículo, como compartimentos de bateria e carenagens, a radiação térmica desempenha um papel relevante na distribuição de calor entre os componentes. Mesmo sem contato direto, superfícies internas irradiam energia umas para as outras, influenciando a temperatura dos dispositivos eletrônicos (Holman, 2010).

Otimização da dissipação térmica em radiadores e dissipadores – Embora a convecção seja o mecanismo predominante em radiadores, a radiação térmica contribui para a transferência de calor, especialmente em temperaturas elevadas. Superfícies anodizadas ou revestidas com materiais de alta emissividade podem aumentar a eficiência do radiador ao emitir mais calor para o ambiente (Kreith, 2000).

A análise da radiação térmica em veículos elétricos pode ser aprimorada utilizando o conceito de fatores de visão, que quantificam a fração da energia radiada por uma superfície

que atinge outra superfície dentro de um sistema fechado. Esse conceito é particularmente útil para prever a distribuição térmica em compartimentos internos do veículo, como o alojamento das baterias e os invólucros eletrônicos (Siegel e Howell, 2016).

Em aplicações avançadas, a radiação térmica pode ser potencializada com o uso de materiais seletivos que modificam suas propriedades de emissividade em diferentes faixas de temperatura. Estudos recentes indicam que revestimentos baseados em nanomateriais, como nanotubos de carbono e filmes finos de cerâmica, podem ser empregados para otimizar a dissipação térmica por radiação em componentes eletrônicos de alta potência, reduzindo a necessidade de sistemas de resfriamento ativos (Tian et al., 2020).

As simulações computacionais também desempenham um papel fundamental na análise da radiação térmica em sistemas de arrefecimento automotivo. Softwares baseados em métodos de elementos finitos (FEA) e Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) permitem prever a distribuição de temperatura nos componentes do veículo e otimizar estratégias de dissipação térmica, reduzindo o peso e melhorando a eficiência energética (Patil et al., 2021).

Portanto, a radiação térmica, apesar de frequentemente ser um mecanismo secundário em comparação com condução e convecção, desempenha um papel importante na dissipação de calor em veículos da Fórmula SAE Elétrica. A escolha de materiais com alta emissividade, a aplicação de revestimentos térmicos e o uso de simulações avançadas permitem otimizar o gerenciamento térmico do veículo, garantindo maior confiabilidade e desempenho em competições.

2.5 BOMBAS ELÉTRICAS E PERDAS DE CARGA

2.5.1 Bombas Elétricas

As bombas elétricas são responsáveis por fornecer a energia mecânica necessária para movimentar o fluido refrigerante dentro do circuito de arrefecimento. Elas convertem energia elétrica em energia hidráulica, criando a diferença de pressão necessária para superar as resistências do sistema e garantir o fluxo contínuo do refrigerante (White, 2011).

Nos veículos da Fórmula SAE, a escolha da bomba elétrica deve considerar parâmetros como:

Vazão necessária (\dot{V} , em L/min), que deve garantir a vazão do fluido para os componentes.

Altura manométrica total (H , em m), que representa a energia que a bomba precisa fornecer para vencer as perdas de carga.

Eficiência da bomba (η), que influencia o consumo energético do sistema.

Tensão e corrente elétrica compatíveis com a alimentação do veículo elétrico.

A equação da potência hidráulica fornecida pela bomba pode ser expressa como:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot \dot{V} \cdot H}{\eta} \quad (6)$$

onde:

P é a potência da bomba (W),

ρ é a densidade do fluido refrigerante (kg/m^3),

g é a aceleração gravitacional (m/s^2),

\dot{V} é a vazão volumétrica (m^3/s),

H é a altura manométrica total (m),

η é a eficiência da bomba (adimensional).

A seleção de uma bomba inadequada pode resultar em fluxo insuficiente, comprometendo a capacidade de resfriamento do sistema, ou em um consumo energético excessivo, reduzindo a eficiência geral do veículo (Çengel e Boles, 2019).

2.5.2 Perda de Carga

A perda de carga (ΔP) refere-se à resistência imposta pelo sistema à passagem do fluido refrigerante, resultando em uma diminuição da pressão disponível ao longo do percurso. Essas perdas podem ser classificadas em:

Perdas de Carga Distribuídas: ocorrem devido ao atrito entre o fluido e as paredes das tubulações. A equação de Darcy-Weisbach é utilizada para estimar essa perda:

$$\Delta P_d = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (7)$$

onde:

f é o fator de atrito de Darcy (adimensional),

L é o comprimento da tubulação (m),

D é o diâmetro interno da tubulação (m),

ρ é a densidade do fluido (kg/m^3),

v é a velocidade média do fluido (m/s).

Perdas de Carga Localizadas: ocorrem devido a mudanças bruscas no escoamento, como curvas, válvulas, conexões e entradas/saídas do radiador. Essas perdas são estimadas pela equação:

$$\Delta P_l = K \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (8)$$

Onde K é o coeficiente de perda localizada, dependente do tipo de singularidade no escoamento (Çengel e Cimbala, 2014).

A perda de carga total do sistema é a soma das perdas distribuídas e localizadas:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_d + \Delta P_l \quad (9)$$

Uma elevada perda de carga pode reduzir a vazão do fluido refrigerante e comprometer a troca térmica no radiador, exigindo uma bomba com maior capacidade e, conseqüentemente, maior consumo energético.

2.6 TROCADORES DE CALOR

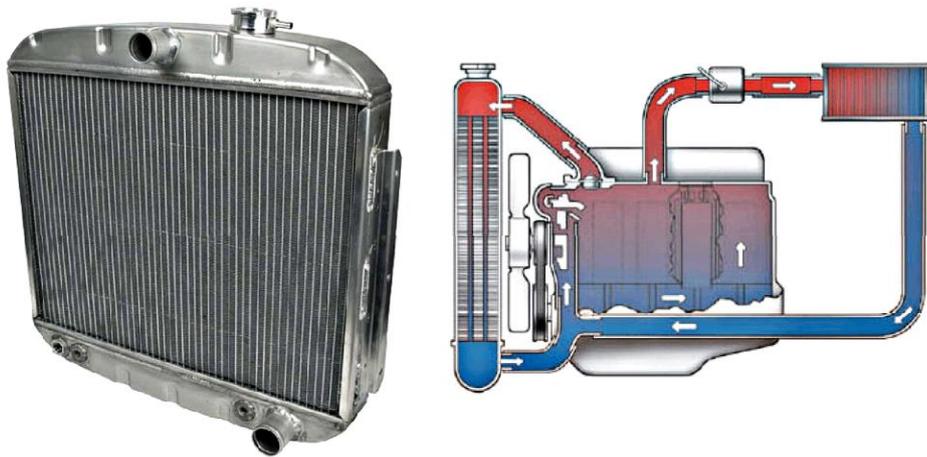
Os trocadores de calor desempenham um papel essencial na dissipação de energia térmica gerada em diversos sistemas mecânicos e eletrônicos. Desde os primeiros experimentos sobre condução térmica realizados por Joseph Fourier no século XIX (Fourier, 1822), até os

avanços na engenharia térmica moderna, os trocadores de calor evoluíram para uma ampla variedade de aplicações, incluindo sistemas de arrefecimento automotivo (Incropera et al., 2008).

Nos veículos elétricos da Fórmula SAE, o radiador atua como o principal trocador de calor, sendo responsável por remover o calor gerado pelos motores elétricos, inversores e baterias. A dissipação eficiente dessa energia térmica é fundamental para garantir o desempenho e a longevidade dos componentes eletrônicos do veículo (Kleinstreuer, 2010).

A **Figura 2.3** mostra um trocador de calor utilizado em veículos.

Figura 2.3 – Trocadores de calor tipo compacto, radiador.



Fonte: UFJF (2025)

2.6.1 Fundamentos dos Trocadores de Calor

Trocadores de calor são dispositivos projetados para transferir energia térmica entre dois fluidos a temperaturas diferentes, sem que ocorra mistura entre eles. A troca de calor pode ocorrer por condução, convecção e, em alguns casos, por radiação térmica (Çengel e Ghajar, 2012). O desempenho de um trocador de calor é geralmente analisado por meio de parâmetros como a taxa de transferência de calor, o coeficiente global de troca térmica e a efetividade do equipamento (Kays e London, 1998).

A equação geral para a taxa de transferência de calor em um trocador de calor é dada por:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (10)$$

onde:

Q é a taxa de calor transferido (W),

U é o coeficiente global de troca térmica (W/m²·K),

A é a área de troca térmica (m²),

ΔT_m é a diferença de temperatura média logarítmica entre os fluidos (°C).

A fórmula do coeficiente global de transferência de calor é derivada da soma das resistências térmicas em série (analogia elétrica), dada por:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{\delta}{k} + \frac{1}{\eta_f * h_o} \quad (11)$$

Conforme Incropera et al. (2007), a eficiência da aleta pode ser considerada como uma média ponderada da razão entre a taxa de calor real transferida por uma aleta e a taxa ideal se a aleta estivesse inteiramente à temperatura da base.

2.6.2 Radiadores como Trocadores de Calor no Sistema de Arrefecimento

Nos veículos da Fórmula SAE, o radiador é um trocador de calor do tipo arrefecido a ar, onde um fluido refrigerante absorve o calor gerado pelos componentes eletrônicos e o transfere para o ar ambiente por meio de um conjunto de aletas metálicas de alta condutividade térmica (Patil et al., 2021).

A operação do radiador é baseada na circulação de um fluido refrigerante, geralmente um líquido composto por uma mistura de água e etilenoglicol, que percorre canais internos do radiador. O calor é então transferido para o ar que passa pelas aletas, promovendo o resfriamento do fluido antes que ele seja recirculado pelo sistema (Çengel e Cimbala, 2014).

A eficiência de um radiador pode ser expressa pela efetividade térmica (ϵ), definida como a razão entre o calor efetivamente trocado e o calor máximo possível que poderia ser transferido:

$$\varepsilon = \frac{Q_{real}}{Q_{máximo}} \quad (12)$$

O desempenho do radiador pode ser otimizado considerando fatores como:

Área de troca térmica: um maior número de aletas melhora a dissipação de calor.

Vazão do fluido refrigerante: um fluxo adequado garante uma remoção eficiente do calor gerado.

Velocidade do ar: quanto maior a velocidade do ar sobre o radiador, maior a taxa de convecção térmica.

2.6.3 Fatores que Afetam a Eficiência do Radiador

A eficiência de um radiador depende de vários fatores, como:

2.6.3.1 Material de Construção

Materiais com alta condutividade térmica, como alumínio, melhoram a dissipação de calor.

O cobre, embora tenha uma condutividade superior, é mais pesado e menos utilizado em aplicações de alto desempenho (Incropera et al., 2008).

2.6.3.2 Geometria das Aletas

Aletas mais finas e em maior número aumentam a área de contato com o ar, melhorando a troca térmica.

Configurações com fluxo cruzado são mais eficientes para a dissipação de calor (Kays e London, 1998).

2.6.3.3 Vazão do Fluido Refrigerante

Um fluxo inadequado pode reduzir a eficiência térmica.

O uso de bombas de circulação de alta eficiência ajuda a manter um fluxo constante (Çengel e Boles, 2019).

2.6.3.4 Velocidade do Ar

Ventiladores podem ser utilizados para aumentar a passagem de ar pelo radiador, aumentando a dissipação térmica.

A aerodinâmica do veículo influencia diretamente a eficiência da troca térmica (Tian et al., 2020).

2.7 SISTEMA DE ARREFECIMENTO EM MOTORES ELÉTRICOS

Com o avanço da mobilidade elétrica e a crescente busca por eficiência energética, os sistemas de arrefecimento em motores elétricos tornaram-se um fator crucial para garantir a confiabilidade e o desempenho desses componentes. Diferentemente dos motores a combustão interna, onde grande parte do calor gerado é dissipada pelos gases de escape, nos motores elétricos a dissipação térmica ocorre principalmente por meio de condução e convecção nos componentes internos, como estator, rotor e enrolamentos (Hendershot & Miller, 2010).

No contexto da Fórmula SAE Elétrico, a gestão térmica do motor elétrico é essencial para evitar superaquecimentos, garantir eficiência energética e aumentar a durabilidade dos componentes. Devido ao uso intenso em competições, esses motores operam sob elevadas cargas térmicas, o que exige um sistema de arrefecimento eficiente e bem projetado (Patterson & Hoke, 2011).

2.7.1 Geração de Calor em Motores Elétricos

O calor gerado em um motor elétrico provém principalmente de três fontes:

1. Perdas Joule nos enrolamentos: ocorre devido à resistência elétrica do cobre nos fios do estator e rotor. Essas perdas são proporcionais ao quadrado da corrente elétrica que percorre os condutores ($P=I^2R$), tornando-se significativas em altas potências (Hughes & Drury, 2013).
2. Perdas no ferro (histerese e correntes parasitas): resultam da magnetização cíclica do núcleo de ferro do motor e da geração de correntes induzidas no material ferromagnético, que aquecem o núcleo (Hanselman, 2003).
3. Atrito e ventilação: o movimento mecânico das partes rotativas gera calor adicional, principalmente devido ao atrito nos rolamentos e às perdas aerodinâmicas no rotor.

Se esse calor não for eficientemente dissipado, pode levar a uma série de problemas, como degradação do isolamento dos enrolamentos, variações na resistência elétrica dos materiais e até falhas mecânicas (Boldea & Nasar, 2010).

2.7.2 Métodos de Arrefecimento de Motores Elétricos

Os sistemas de arrefecimento de motores elétricos podem ser classificados em passivos e ativos, dependendo da necessidade de controle térmico do motor.

2.7.2.1 Arrefecimento por Convecção Natural (Passivo)

Utiliza a dissipação de calor para o ambiente sem auxílio de componentes adicionais. Geralmente aplicado em motores de baixa potência, onde a geração de calor não é crítica.

No contexto da Fórmula SAE Elétrico, esse método não é suficiente devido às altas potências e exigências térmicas do motor.

2.7.2.2 Arrefecimento por Ventilação Forçada (Ativo)

Utiliza ventoinhas ou dutos de ar direcionados para melhorar a dissipação térmica.

Esse método é comum em motores industriais e de veículos elétricos leves, onde a refrigeração líquida não é viável.

Pode ser aplicado em veículos de competição para complementar o arrefecimento líquido.

2.7.2.3 Arrefecimento a Líquido (Ativo)

Consiste na circulação de um fluido refrigerante através de canais internos ou carcaças ao redor do motor.

Proporciona uma dissipação térmica mais eficiente, reduzindo a temperatura de operação e melhorando a confiabilidade.

É a abordagem mais utilizada em motores de veículos elétricos de alta performance, como os da Fórmula SAE Elétrico (Maldonado et al., 2020).

2.7.3 Arrefecimento Líquido em Motores da Fórmula SAE Elétrico

Na maioria dos projetos de Fórmula SAE Elétrico, o sistema de arrefecimento do motor elétrico é baseado em circuitos fechados de refrigeração líquida. Esse sistema geralmente inclui os seguintes componentes:

Radiador: responsável pela troca térmica entre o fluido refrigerante e o ambiente, garantindo que o líquido retorne ao circuito em temperaturas mais baixas.

Bomba de circulação: essencial para manter o fluxo do fluido refrigerante através do motor e do radiador, assegurando a remoção eficiente do calor gerado.

Trocadores de calor internos: podem estar embutidos na carcaça do motor ou envolver os enrolamentos do estator para otimizar a remoção do calor gerado.

Reservatório de expansão: permite compensar variações no volume do fluido devido à dilatação térmica.

Tubulação e conexões: conduzem o fluido refrigerante entre os diferentes componentes do sistema.

O dimensionamento adequado desses componentes é essencial para garantir que o sistema seja eficiente sem adicionar peso ou complexidade excessiva ao veículo (Husain, 2020).

2.7.4 Materiais e Fluidos Utilizados no Arrefecimento

A escolha dos materiais e do fluido refrigerante impacta diretamente na eficiência do sistema de arrefecimento. No caso dos motores elétricos da Fórmula SAE Elétrico, algumas opções comuns incluem:

Água desmineralizada com etilenoglicol: oferece boa capacidade térmica e previne a corrosão interna do sistema.

Óleos dielétricos: podem ser utilizados em motores onde o fluido entra em contato direto com os componentes elétricos, sem risco de curtos-circuitos.

Fluidos refrigerantes de alta eficiência térmica: compostos à base de nanopartículas podem melhorar a condução térmica e otimizar a troca de calor (Peters et al., 2016).

2.7.5 Impacto do Arrefecimento no Desempenho do Motor Elétrico

Um sistema de arrefecimento eficiente traz diversos benefícios para o desempenho do motor elétrico em um veículo de competição, como:

Maior eficiência energética: reduz perdas térmicas, garantindo que mais energia elétrica seja convertida em trabalho útil.

Aumento da potência e torque: evita que o motor perca desempenho devido ao aquecimento excessivo.

Maior vida útil dos componentes: reduz o desgaste térmico dos materiais isolantes e dos rolamentos.

Estabilidade térmica: mantém a temperatura de operação dentro da faixa ideal, evitando oscilações no desempenho.

Segundo Patterson & Hoke (2011), um motor elétrico bem arrefecido pode operar em condições ideais por períodos mais longos, garantindo maior competitividade em provas de resistência, como o Enduro da Fórmula SAE.

2.7.6 Dissipação de calor em componentes elétricos

Segundo Çengel e Boles (2015), a eficiência de um sistema é definida como a razão entre a saída útil de energia e a entrada de energia. Aplicado a motores e inversores, temos:

$$q_{dissipado} = Potência \times (1 - eficiência) \quad (13)$$

Esse modelo é válido tanto para motores elétricos, que transformam energia elétrica em energia mecânica, quanto para inversores de frequência, que convertem corrente contínua em corrente alternada com controle de frequência, mas com perdas internas que geram calor.

2.7.7 Capacidade Térmica

Segundo Çengel e Boles (2015), a capacidade térmica de um sistema é uma medida da inércia térmica, ou seja, da resistência do corpo em variar sua temperatura quando exposto a uma fonte de calor. Um corpo com alta capacidade térmica requer mais energia para sofrer uma elevação de temperatura.

$$C = m \cdot c \quad (14)$$

Onde:

C é a capacidade térmica total do corpo [J/K],

m é a massa do corpo [kg],

c é o calor específico do material [J/kg · K].

2.8 BALANÇO DE MASSA

Desde os primórdios da engenharia e da ciência dos materiais, a conservação da massa tem sido um princípio fundamental na análise de processos físicos e químicos. A ideia de que a matéria não pode ser criada nem destruída remonta aos trabalhos de Antoine Lavoisier no século XVIII, que estabeleceu a base da lei da conservação da massa ao demonstrar que a soma das massas dos reagentes em uma reação química é igual à soma das massas dos produtos (Lavoisier, 1789). Essa lei se tornou um dos pilares da engenharia, sendo amplamente aplicada na modelagem e otimização de sistemas térmicos, fluidodinâmicos e químicos (Bird, Stewart e Lightfoot, 2007).

A formulação matemática do balanço de massa é amplamente utilizada para descrever sistemas abertos e fechados, sendo expressa na forma diferencial ou integral. A equação geral do balanço de massa pode ser escrita como:

$$\frac{dM}{dt} = \sum \dot{m}_{entrada} - \sum \dot{m}_{saída} \quad (15)$$

onde:

- M é a massa total do sistema,
- \dot{m} representa a taxa de fluxo mássico (kg/s).

No contexto dos sistemas térmicos e mecânicos, o balanço de massa é fundamental para garantir a conservação da matéria nos processos de transporte de fluidos, incluindo aqueles que envolvem transferência de calor e mudanças de fase (Çengel e Cimbala, 2014). Em aplicações automotivas, a correta formulação do balanço de massa permite prever e otimizar o comportamento de sistemas de arrefecimento, garantindo a eficiência da dissipação térmica e a estabilidade operacional dos componentes (Kleinstreuer, 2010).

Nos veículos elétricos da Fórmula SAE, o balanço de massa é aplicado ao controle do fluxo de fluido refrigerante no sistema de arrefecimento, garantindo que a quantidade de fluido circulante seja suficiente para remover o calor gerado pelos motores elétricos, inversores e baterias. O sistema de arrefecimento pode ser baseado em arrefecimento líquido, utilizando

misturas como água desionizada e etileno-glicol, ou em arrefecimento a ar, onde a troca térmica ocorre por convecção forçada (Incropera et al., 2008).

2.8.1 Balanço de Massa em Sistemas de Arrefecimento Líquido

Os sistemas de resfriamento líquido operam em circuitos fechados, nos quais a vazão de fluido refrigerante deve ser mantida constante para evitar variações indesejadas de temperatura. O balanço de massa nesse caso pode ser expresso como:

$$\dot{m}_{bomba} = \dot{m}_{radiador} \quad (16)$$

Onde a massa de fluido que entra no radiador é igual àquela que sai, garantindo que não haja acúmulo de fluido em nenhum ponto do sistema. A bomba de circulação deve ser dimensionada corretamente para fornecer a vazão necessária e evitar cavitação, que poderia comprometer a eficiência do resfriamento (Patil et al., 2021).

2.8.2 Balanço de Massa em Sistemas de Arrefecimento a Ar

Nos sistemas que utilizam ar como meio de resfriamento, o fluxo de ar que entra nos dutos ou radiadores deve ser balanceado com o fluxo que sai, garantindo que a troca térmica ocorra de maneira eficiente. O balanço de massa para um duto de ventilação pode ser expresso como:

$$\dot{m}_{entrada} = \dot{m}_{saída} \quad (17)$$

Onde a vazão mássica de ar depende da densidade do fluido (ρ), da velocidade (V) e da área da seção transversal (A), de acordo com a equação:

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A \quad (18)$$

Esse princípio é essencial no dimensionamento de ventoinhas e dutos de resfriamento, otimizando a dissipação térmica e reduzindo o arrasto aerodinâmico (Çengel e Ghajar, 2012).

2.8.3 Modelagem Computacional do Balanço de Massa

Com o avanço das técnicas de simulação, softwares baseados em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e métodos de elementos finitos (FEA) são amplamente utilizados para prever o comportamento do fluxo de refrigerante em sistemas de arrefecimento automotivo. Estudos indicam que a correta modelagem do balanço de massa pode melhorar em até 20% a eficiência térmica dos inversores e baterias, aumentando a autonomia do veículo e reduzindo o risco de falhas térmicas (Tian et al., 2020).

Além disso, a otimização do fluxo de fluido refrigerante pode reduzir o consumo energético da bomba de circulação e minimizar perdas por atrito nos dutos e trocadores de calor. O uso de modelagem computacional permite avaliar diferentes geometrias e configurações, auxiliando na escolha de materiais e no design do sistema de resfriamento (Siegel e Howell, 2016).

2.9 BALANÇO DE ENERGIA

Desde os primeiros estudos sobre termodinâmica, a conservação de energia tem sido um princípio fundamental para a análise de sistemas físicos e mecânicos. A formulação matemática da Primeira Lei da Termodinâmica, desenvolvida no século XIX por cientistas como James Prescott Joule e Rudolf Clausius, estabeleceu que a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada de uma forma para outra (Clausius, 1865). Esse princípio é essencial para a modelagem de processos térmicos, incluindo a análise de sistemas de arrefecimento, onde a energia térmica deve ser gerenciada para evitar o superaquecimento de componentes (Çengel e Boles, 2019).

No contexto dos veículos elétricos da Fórmula SAE, o balanço de energia é aplicado para entender e otimizar a dissipação de calor gerado pelos motores, inversores e baterias. O sistema de arrefecimento deve garantir que o calor seja eficientemente transferido para o meio

externo, evitando falhas térmicas e assegurando o desempenho ideal do veículo (Kleinstreuer, 2010).

2.9.1 Formulação Matemática do Balanço de Energia

O balanço de energia em um sistema fechado ou aberto pode ser expresso de forma geral pela equação:

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{Q} - \sum \dot{W} + \sum \dot{m} \cdot h_{entrada} - \sum \dot{m} \cdot h_{saída} \quad (19)$$

onde:

- E é a energia total do sistema,
- \dot{Q} representa a taxa de calor trocado com o ambiente,
- \dot{W} é o trabalho realizado pelo sistema,
- \dot{M} representa a vazão mássica do fluido refrigerante,
- h é a entalpia do fluido nas condições de entrada e saída.

Em sistemas de arrefecimento de veículos elétricos, o trabalho mecânico \dot{W} pode ser associado à bomba de circulação do fluido refrigerante, enquanto o calor \dot{Q} corresponde à energia térmica removida dos componentes eletrônicos (Çengel e Ghajar, 2012).

2.9.2 Aplicação do Balanço de Energia no Sistema de Arrefecimento de Veículos da Fórmula SAE

O sistema de arrefecimento em veículos elétricos tem como objetivo dissipar a energia térmica gerada pelos componentes do powertrain. A principal fonte de calor nos veículos da Fórmula SAE são os motores elétricos e os inversores, que podem atingir temperaturas elevadas devido à dissipação de energia elétrica em forma de calor (Patil et al., 2021).

2.9.3 Balanço de Energia no Sistema de Arrefecimento Líquido

Nos sistemas de arrefecimento líquido, a energia térmica é transferida dos componentes para o fluido refrigerante, que posteriormente libera esse calor no radiador. O balanço de energia pode ser expresso como:

$$\dot{Q}_{motor} + \dot{Q}_{inversor} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{saída} - T_{entrada}) \quad (20)$$

onde:

- \dot{Q}_{motor} e $\dot{Q}_{inversor}$ são as taxas de calor geradas pelo motor e inversor, respectivamente,
- \dot{m} é a vazão mássica do fluido refrigerante,
- c_p é o calor específico do fluido,
- $T_{saída}$ e $T_{entrada}$ são as temperaturas do fluido na entrada e saída do radiador.

Esse balanço é essencial para garantir que o sistema de arrefecimento seja dimensionado corretamente, permitindo a remoção eficiente do calor gerado e evitando o superaquecimento dos componentes eletrônicos (Incropera et al., 2008).

2.9.4 Balanço de Energia em Sistemas de Arrefecimento a Ar

Nos sistemas que utilizam ar como meio de resfriamento, a energia térmica é dissipada diretamente para o ambiente por meio de convecção. O balanço de energia para um radiador ou dissipador de calor pode ser expresso como:

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_{superfície} - T_{ar}) \quad (21)$$

onde:

- h é o coeficiente de transferência de calor por convecção,
- A é a área de troca térmica,
- $T_{superfície}$ é a temperatura do componente resfriado,
- T_{ar} é a temperatura do ar ambiente.

Esse tipo de análise permite otimizar a aerodinâmica do sistema de arrefecimento, garantindo que a quantidade de ar que passa pelos radiadores seja suficiente para dissipar o calor de forma eficiente (Çengel e Cimbala, 2014).

2.9.5 Modelagem Computacional do Balanço de Energia

A simulação computacional tem sido uma ferramenta essencial na análise do balanço de energia em sistemas de arrefecimento automotivo. Técnicas como Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e Análise de Elementos Finitos (FEA) permitem prever a distribuição de temperatura e fluxo térmico no sistema, possibilitando ajustes no design para otimização da dissipação de calor (Tian et al., 2020).

Estudos indicam que otimizações baseadas em CFD podem reduzir a temperatura operacional dos inversores em até 15%, aumentando a confiabilidade do sistema e reduzindo perdas energéticas. Além disso, a escolha de materiais com alta condutividade térmica para dissipadores e radiadores pode melhorar significativamente o desempenho térmico do sistema (Siegel e Howell, 2016).

2.10 MATLAB

O MATLAB é uma linguagem de programação e um ambiente computacional desenvolvido pela empresa MathWorks, amplamente utilizado na resolução de problemas matemáticos e de engenharia. Sua aplicação na resolução numérica de equações diferenciais ordinárias (EDOs) tem sido destaque, especialmente por meio da utilização de métodos numéricos como o de Runge-Kutta (CHAPMAN, 2020).

Equações diferenciais ordinárias são fundamentais na modelagem de sistemas dinâmicos encontrados em diversas engenharias. No entanto, muitas vezes não possuem solução analítica exata, sendo necessário o uso de métodos numéricos para sua resolução (BURDEN; FAIRES, 2010). Um dos métodos mais utilizados é o de Runge-Kutta de quarta ordem, que oferece boa precisão e estabilidade computacional. Esse método estima o valor da função passo a passo a partir de médias ponderadas de inclinações intermediárias (BURDEN; FAIRES, 2010).

No MATLAB, embora seja possível implementar manualmente o método de Runge-Kutta clássico, existe a função `ode45`, que utiliza uma variante mais eficiente: o método de Dormand-Prince, uma forma adaptativa de Runge-Kutta de ordem variável (SHAMPINE; REICHEL, 1997). Essa função é amplamente empregada devido à sua capacidade de ajustar

automaticamente o tamanho do passo de integração com base na estimativa de erro, otimizando o tempo de execução e garantindo maior confiabilidade nos resultados.

A documentação oficial da MathWorks fornece orientações detalhadas sobre o uso da *ode45* e outras rotinas numéricas para a resolução de EDOs, sendo um recurso essencial para engenheiros e cientistas que trabalham com modelagem matemática (MATHWORKS, 2024).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 COMPONENTES DO SISTEMA

3.1.1 Reservatório

A **Figura 3.4** – Reservatório mostra o reservatório que armazena o fluido de arrefecimento, proporcionando uma reserva para compensar variações térmicas e garantir a estabilidade do sistema.

Figura 3.4 – Reservatório



Fonte: Autor

A **Tabela 3.1** – Dados do reservatório apresenta os dados do reservatório.

Tabela 3.1 – Dados do reservatório

Propriedade	Valor	Unidade
Diâmetro	0.12	m

Altura	0.30	m
--------	------	---

3.1.2 Bomba Submersa

Responsável por impulsionar o fluido de arrefecimento pelo sistema, assegurando uma circulação contínua para dissipação de calor.

A bomba utilizada é uma bomba submersa que está localizada dentro do reservatório.

Na **Tabela 3.2** – Dados da bombasão apresentados os dados de vazão volumétrica e vazão mássica da bomba.

Tabela 3.2 – Dados da bomba

	Vazão Volumétrica (L/min)	Vazão Mássica (kg/s)
Bomba	30	0,425

A **Figura 3.5** – Bomba submersa elétrica mostra o modelo de bomba submersa elétrica utilizada no sistema de arrefecimento.

Figura 3.5 – Bomba submersa elétrica



Fonte: MERCADO LIVRE (2025)

3.1.3 Mangueiras e Conexões

Conduzem o fluido de arrefecimento entre os componentes, formando uma rede vital para o transporte eficiente do calor. A mangueira e conexão utilizada no sistema de arrefecimento é mostrada na **Figura 3.6**.

3.1.3.1 Dimensões

Comprimento: aproximadamente 2,5 metros

Diâmetro: 3 centímetros (0.03 metros)

Dados e Considerações Adicionais (Relevantes para Análise):

Material: Borracha EPD

Importância: Compatibilidade com o fluido, resistência à temperatura

Diâmetro Interno: 0.025 metros (3 cm)

Figura 3.6 – Mangueira e conexão



Fonte: Autor

3.1.4 Radiador

O radiador facilita a troca de calor com o ambiente, promovendo a dissipação térmica.

A área do trocador de calor foi medida manualmente e o resultado foi aproximadamente 0,615m².

Tipo: Radiador de tubo-aleta

3.1.4.1 Dimensões Gerais

Comprimento (L): 0.3 m

Largura (W): 0.2 m

Altura (H): 0.04 m

3.1.4.2 Tubos

Diâmetro externo do tubo (d_o): 0.005 m (5 mm)

Diâmetro interno do tubo (d_i): 0.004 m (4 mm)

Número de tubos (N_t): 50

Arranjo dos tubos: Escalono

Passo transversal do tubo (S_t): 0.01 m

Passo longitudinal do tubo (S_l): 0.00866 m (para arranjo escalonado com $S_t/2$)

3.1.4.3 Aletas

Material: Alumínio ($k_{al} = 205 \text{ W/m.K}$)

Tipo: Plana contínua

Espaçamento das aletas (S_f): 0.002 m (2 mm)

Espessura da aleta (t_f): 0.0002 m (0.2 mm)

Altura da aleta (H_f): 0.01 m (10 mm)

3.1.4.4 Operação

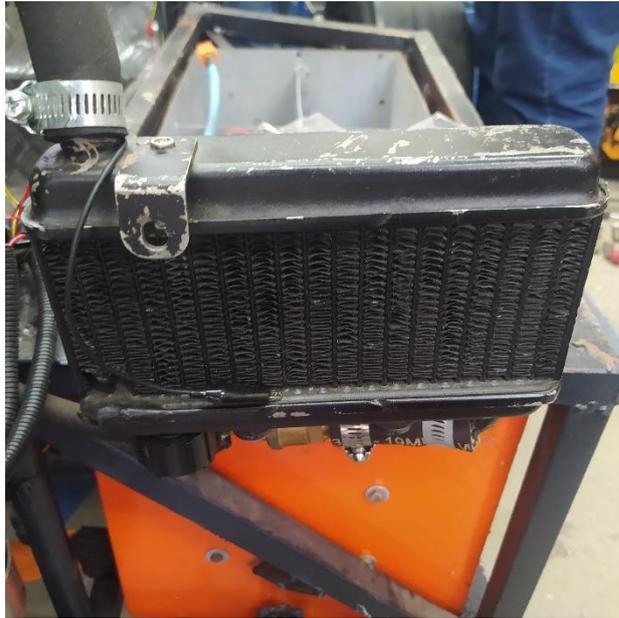
Vazao_L_min = 30 L/min

Vazao_m3_s = 0.0005 m³/s

velocidade_ar = 20 m/s

A **Figura 3.7** apresenta o radiador (trocador de calor) utilizado no sistema de arrefecimento.

Figura 3.7 – Radiador



Fonte: Autor

3.1.5 Fluido de Arrefecimento

O fluido utilizado é o óleo dielétrico, e suas propriedades foram obtidas da literatura (Perry's Chemical Engineers' Handbook). A **Tabela 3.3** apresenta os dados obtidos para o fluido de arrefecimento.

Tabela 3.3 – Dados do fluido de arrefecimento

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	820	kg/m ³
Viscosidade	1,10E-05	Pa.s
Calor Específico	2100	J/kg.K
Condutividade Térmica	145	W/m.K

3.1.6 Motor

Equipamento responsável por receber energia elétrica e gerar energia mecânica. Na **Figura 3.8** é possível observar o motor elétrico YASA 750R.

Figura 3.8 – Motor YASA 750R



Fonte: YASA (2025)

3.1.7 Inversor

Equipamento responsável por transformar a corrente contínua vinda das baterias em corrente alternada e envia-lá para o motor. A **Figura 3.9** exhibe um modelo de inversor sevcon.

Figura 3.9 – Inversor Sevcon

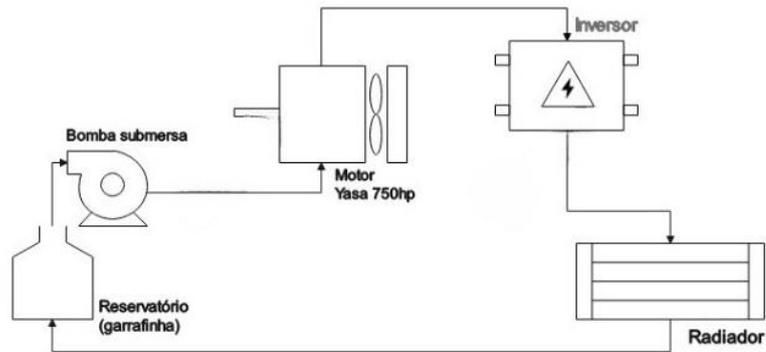


Fonte: Sevcon (2025)

Conforme mostrado na **Figura 3.10**, o sistema de arrefecimento opera em ciclos, onde o fluido de arrefecimento sairá do reservatório e será impulsionado pela bomba para o motor e o

inversor para realizar a troca de calor, logo após o fluido irá para o trocador de calor, onde irá trocar calor com o ar externo e voltará para o reservatório para iniciar o ciclo novamente.

Figura 3.10 – Diagrama do sistema de arrefecimento



3.2 CÁLCULO DE CALOR DISSIPADO

Para obtenção dos dados de calor dissipado do motor e do inversor, usou-se a equação (13), esses dados são apresentados na **Tabela 3.4**:

Tabela 3.4 – Dados de calor dissipado pelo motor e inversor

Componentes	Potência (kw)	Eficiência (%)	Calor dissipado (kw)
Motor	54	96	2,16
Inversor	60	95	3

3.3 CAPACIDADE TÉRMICA DO MOTOR E INVERSOR

Para calcular a capacidade térmica dos componentes utilizou-se a equação (14).

Capacidade térmica do aço e do cobre conforme a literatura (Perry's Chemical Engineers' Handbook):

Aço ($C_{\text{aço}} \approx 450\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)

Cobre ($C_{\text{cobre}} \approx 385\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)

3.3.1 Motor

Cálculo da capacidade térmica para o motor:

Massa do motor: 40 kg

Massa de Aço: $40\text{kg} \cdot 0.60 = 24\text{kg}$

Massa de Cobre: $40\text{kg} \cdot 0.40 = 16\text{kg}$

$C_{\text{motor}} = C_{\text{aço}} + C_{\text{cobre}} = 12600\text{J/K} + 4620\text{J/K} = 17220\text{ J/K}$

3.3.2 Inversor

Cálculo da capacidade térmica para o inversor:

Massa do inversor: 15 kg

Composição: Aço e 50% cobre

$C_{\text{inversor}} = C_{\text{aço}} + C_{\text{cobre}} = 3375\text{ J/K} + 2887.5\text{ J/K} = 6262.5\text{ J/K}$

3.4 CÁLCULO DA PERDA DE CARGA

Os cálculos da perda de carga foram realizados utilizando as equações (7), (8) e (9). Com a realização desses cálculos, foi possível obter os valores da velocidade do fluido (v), Reynolds (Re), o fator de atrito (f) e a variação de pressão (ΔP), esses valores foram apresentados na **Tabela 3.5**.

Tabela 3.5 – Dados do cálculo de perda de carga

Etapa	Cálculo	Resultado	Unidade
1.1	$A = \pi * (0.03\text{ m} / 2)^2$; $v = 0.0005\text{ m}^3/\text{s} / A$	$v \approx 0.71$	m/s
1.2	$Re = (820\text{ kg/m}^3 * 0.71\text{ m/s} * 0.03\text{ m}) / 0.000011\text{ Pa.s}$	$Re \approx 1584547$	-
1.3	Como $Re > 4000$, $f \approx 0.316 / 1584547^{0.25}$	$f \approx 0.012$	-

1.4	$\Delta P = 0.012 * (3 \text{ m} / 0.03 \text{ m}) * (820 \text{ kg/m}^3 * (0.71 \text{ m/s})^2 / 2)$	$\Delta P \approx 2490$	Pa
-----	---	-------------------------	----

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CÁLCULO DO COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (U) DO TROCADOR DE CALOR (RADIADOR)

O cálculo do coeficiente global de transferência de calor foi realizado utilizando a equação (11). Os resultados obtidos estão a seguir:

Reynold interno: 6366.20

hi (interno): 1730.44 W/m²K

Reynolds externo: 26666.67

ho (externo): 121.85 W/m²K

U (global): 103.03 W/m²K

4.2 SIMULAÇÃO DO NÍVEL DO RESERVATÓRIO

É importante saber o nível do reservatório pois a bomba utilizada é uma bomba submersa que deve sempre estar submersa no líquido de arrefecimento dentro do reservatório, a bomba tem cerca de 10 centímetros, por isso, caso o nível do reservatório caia abaixo desse valor existe o risco da bomba não funcionar corretamente.

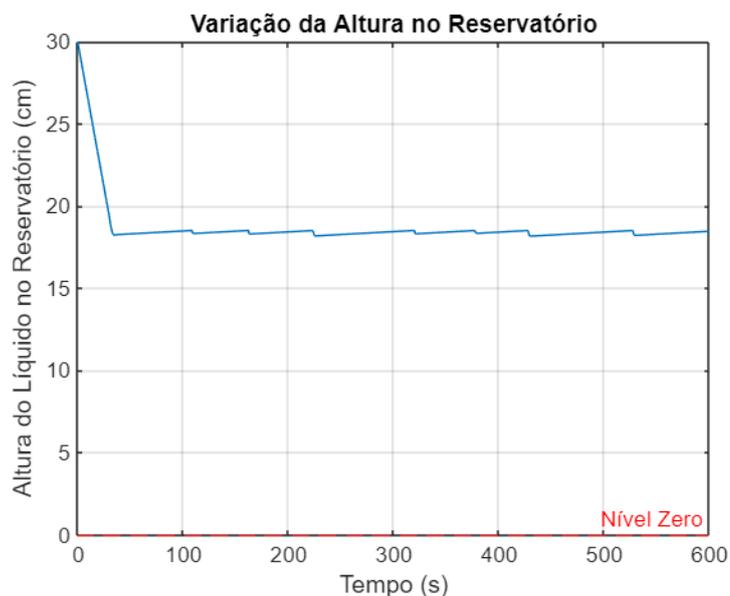
A simulação do nível do reservatório foi feita utilizando o software Matlab utilizando as equações de balanço de massa (15) e perda de carga (7), variando os valores de vazões da bomba, ao realizar todas as considerações a equação final ficou da seguinte forma:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A_{res}} * \left[\frac{\Delta P}{R} - Q_{out} \right] \quad (22)$$

4.2.1 Simulação do nível do reservatório para uma vazão da bomba de 15L/min

O Gráfico 4.1 mostra a variação da altura do líquido no reservatório pelo tempo quando o sistema de arrefecimento está em funcionamento. No início o nível de líquido no reservatório irá diminuir, pois o líquido irá sair do reservatório com a vazão inicial da bomba, irá percorrer todo o sistema (mangueiras, motor, inversor, trocador de calor) e irá voltar para o reservatório, operando em um sistema fechado. Quando o líquido retorna para o reservatório o nível do tanque para de cair e se mantém constante, isso significa que a quantidade de líquido que está saindo será igual ou muito próxima a quantidade de líquido que está entrando no reservatório.

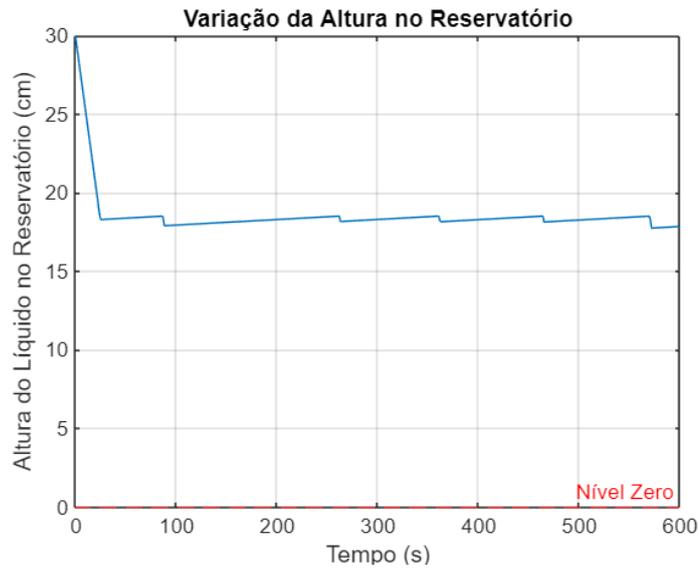
Gráfico 4.1 – Simulação do nível do reservatório para uma vazão de 15L/min



4.2.2 Simulação do nível do reservatório para uma vazão da bomba de 20L/min

O Gráfico 4.2 mostra uma queda inicial no nível do reservatório, porém, com essa vazão vemos que o nível do tanque sofre uma variação um pouco maior com o decorrer do tempo.

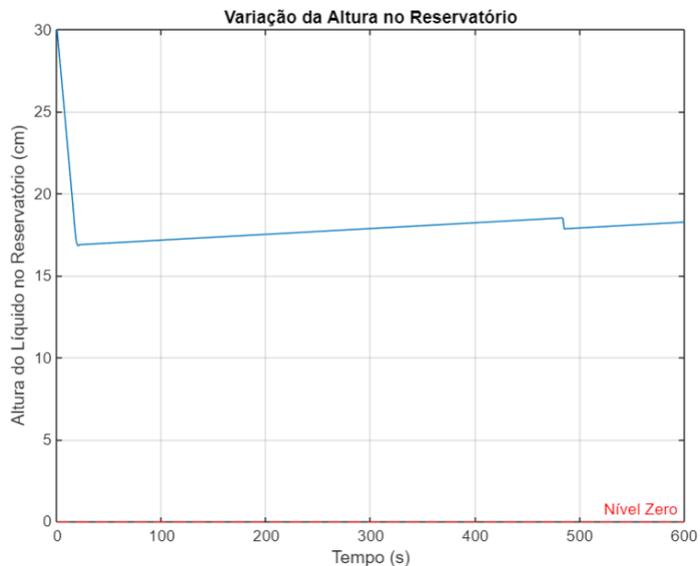
Gráfico 4.2 – Simulação do nível do reservatório para uma vazão de 20L/min



4.2.3 Simulação do nível do reservatório para uma vazão da bomba de 30L/min

No Gráfico 4.3 é utilizada uma vazão maior para a bomba, com isso vemos que o nível do reservatório cai até aproximadamente 16 centímetros quando o sistema de arrefecimento inicia e aumenta conforme o decorrer do tempo.

Gráfico 4.3 – Simulação do nível do reservatório para uma vazão de 30L/min



4.3 SIMULAÇÕES DAS TEMPERATURAS DOS COMPONENTES

As simulações das temperaturas dos componentes foram realizadas com auxílio do software Matlab utilizando a equação de balanço de energia (19). Foram obtidas equações de variação de temperatura pelo tempo para cada componente e para o fluido de arrefecimento.

Para o motor:

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{(Q_m - h_m(T_m - T_o))}{C_m} \quad (23)$$

Para o inversor:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{Q_i - h_i(T_i - T_o)}{C_i} \quad (24)$$

Para o fluido de arrefecimento:

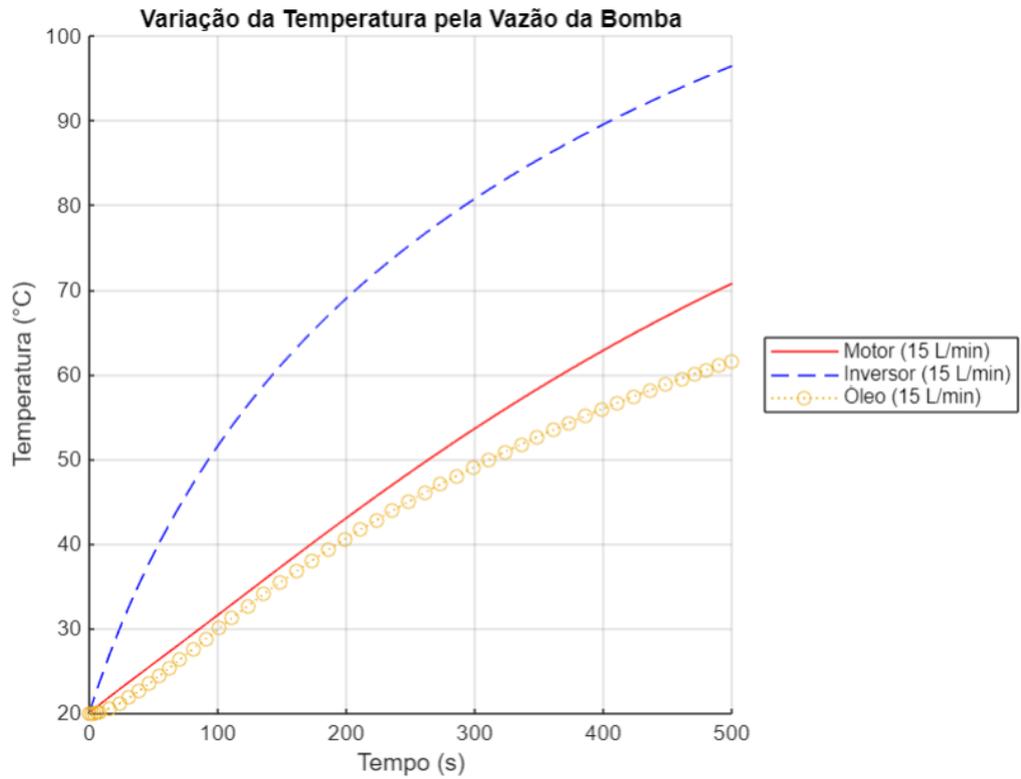
$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{h_m(T_m - T_o) + h_i(T_i - T_o) - Q_r}{C_o} \quad (25)$$

Foi feita uma variação na vazão da bomba para obtermos as temperaturas com base em diferentes vazões.

4.3.1 Simulação considerando a vazão da bomba em 15L/min:

Conforme mostra o Gráfico 4.4 considerando a vazão de 15L/min, as temperaturas dos componentes se mostram altas, com a temperatura do inversor chegando a quase 100°C.

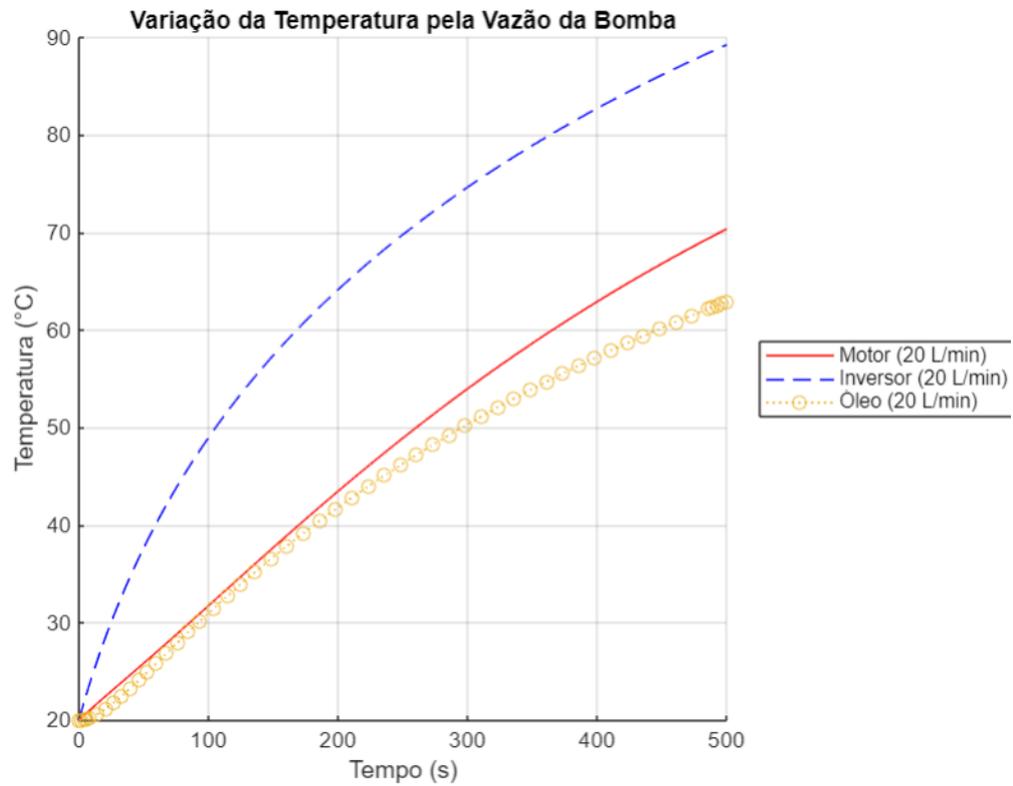
Gráfico 4.4 – Simulação das temperaturas dos componentes com vazão á 15L/min



4.3.2 Simulação considerando a vazão da bomba em 20L/min:

No **Gráfico 4.5** nota-se uma temperatura menor dos componentes, o aumento da vazão contribui para a diminuição da temperatura dos componentes, tendo em vista que o fluido irá circular mais rápido pelo sistema.

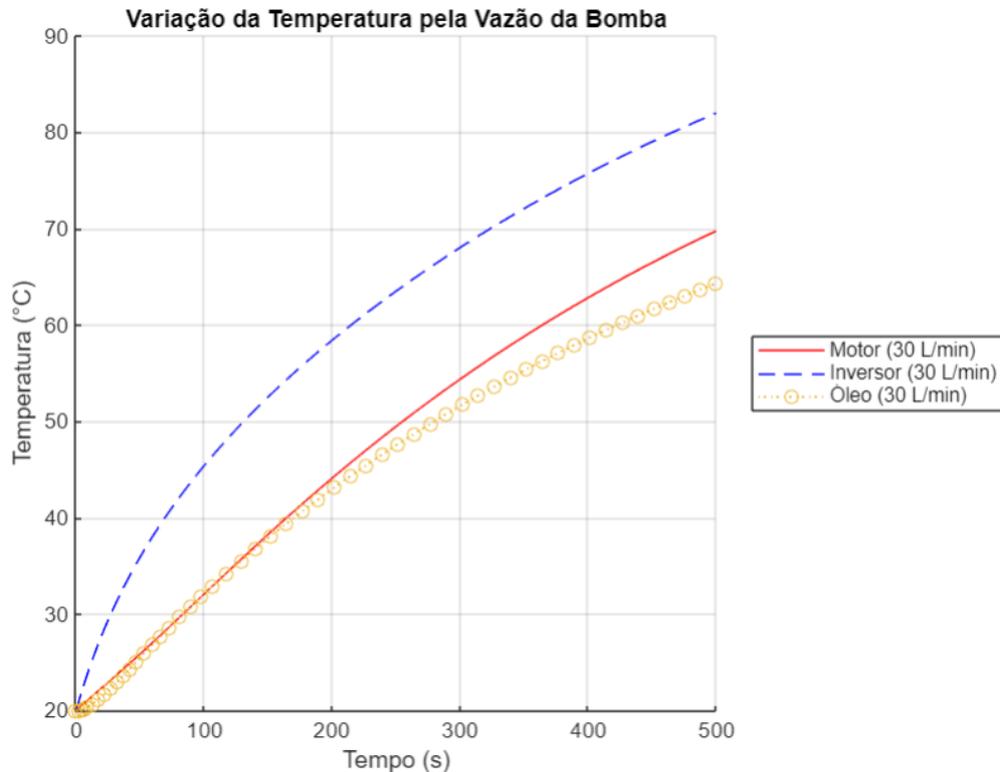
Gráfico 4.5 – Simulação das temperaturas dos componentes com vazão á 20L/min



4.3.3 Simulação considerando a vazão da bomba em 30L/min:

No **Gráfico 4.6** pode-se observar que utilizando uma vazão maior as temperaturas são menores. Com a vazão de 30L/min a temperatura do inversor chega a aproximadamente 80°C ao decorrer de 500 segundos, que é uma temperatura recomendável para operação desse equipamento eletrônico.

Gráfico 4.6 – Simulação das temperaturas dos componentes com vazão á 30L/min



5 CONCLUSÃO

As simulações realizadas forneceram dados valiosos sobre o comportamento dinâmico do sistema de arrefecimento proposto. A fase inicial de preenchimento impacta significativamente o nível do reservatório, demandando um dimensionamento adequado.

A tendência de aumento contínuo das temperaturas dos componentes, mesmo com uma vazão de 30 L/min, indica que o sistema, com os parâmetros atuais, pode não ser suficiente para atingir um equilíbrio térmico estável dentro de um período de operação prolongado. A maior temperatura observada no inversor requer uma atenção especial no projeto térmico ou na otimização da sua interface com o sistema de arrefecimento.

A otimização do sistema pode envolver a avaliação de um trocador de calor mais eficiente, o ajuste da vazão da bomba (considerando o balanço entre o desempenho de arrefecimento e o consumo de energia), e uma análise detalhada do design térmico dos componentes para maximizar a transferência de calor para o fluido. Simulações futuras deveriam explorar períodos de tempo mais longos e diferentes condições de operação do veículo para uma avaliação mais abrangente da eficácia do sistema de arrefecimento.

6 SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

O presente estudo apresenta uma abordagem simplificada para a análise do sistema de arrefecimento de um veículo elétrico da Fórmula SAE, com base em balanços de massa e simulações unidimensionais no MATLAB. No entanto, diversas possibilidades podem ser exploradas em trabalhos futuros para aprofundar e refinar os resultados obtidos.

Uma das principais sugestões é a implementação de simulações computacionais fluidodinâmicas (CFD) em 3D, por meio de softwares como ANSYS Fluent, SimScale, GT Suíte ou OpenFOAM. Essas simulações permitiriam analisar com maior precisão os fenômenos de escoamento e troca térmica no interior do sistema, levando em conta a geometria real das mangueiras, componentes eletrônicos e trocadores de calor. Além disso, seria possível observar zonas de recirculação, gradientes de temperatura, velocidades locais do fluido e pontos de possível cavitação, informações cruciais para a melhoria do desempenho térmico e hidráulico do sistema.

Outra possibilidade promissora envolve a aplicação de técnicas de Inteligência Artificial (IA) para otimização do sistema de arrefecimento. A utilização de redes neurais, algoritmos genéticos ou aprendizado de máquina supervisionado pode auxiliar na predição de falhas, na estimativa do comportamento do sistema em diferentes condições de operação e na otimização de parâmetros como o diâmetro de tubulações, a posição dos componentes e a curva de funcionamento da bomba. Além disso, modelos preditivos baseados em IA podem ser embarcados no veículo para um sistema de controle térmico inteligente em tempo real, capaz de ajustar a vazão de fluido ou ativar trocadores de calor auxiliares de forma autônoma.

7 REFERÊNCIAS

BIOT, J.-B. Recherches expérimentales et mathématiques sur les mouvements de la chaleur. *Journal de Physique*, v. 59, p. 193-223, 1804.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Transport phenomena*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

BOLTZMANN, L. Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe. II. Abteilung*, v. 66, p. 275–370, 1872.

BOLTZMANN, L. Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie. *Annalen der Physik*, v. 22, n. 2, p. 291–294, 1884.

CHOI, S. U. S.; ZHANG, Z. G.; EBSEN JR, C. B.; EASTMAN, J. A.; LEE, J. Enhanced thermal conductivity of Ethene oxide ethylene glycol mixture containing multiwalled carbon nanotube. *Applied Physics Letters*, v. 79, n. 14, p. 2252-2254, 1995.

CLAUSIUS, R. *The mechanical theory of heat*. London: John Van Voorst, 1867. (Note: It's best to give the most accurate publication info possible. 1865 might be a reprint or translation year. Giving the original language title is also good practice.)

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. *Thermodynamics: an engineering approach*. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Fluid mechanics: fundamentals and applications*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

ÇENGEL, Y. A.; GHJAR, A. J. *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

ÇENGEL, Y. A.; TURNER, R. H. *Fundamentals of thermal-fluid sciences*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2016.

DEBYE, P. Zur Theorie der spezifischen Wärmen. *Annalen der Physik*, v. 39, n. 4, p. 789–839, 1912.

FOURIER, J. *Théorie analytique de la chaleur*. Paris: Firmin Didot Père et Fils, 1822.

FSAE. *Formula SAE Rules 2023*. Warrendale: SAE International, 2023.

HANSELMAN, D. C. *Brushless permanent magnet motor design*. 2nd ed. McGraw-Hill, 2003.

HENDERSHOT, J. R.; MILLER, T. J. E. *Design of brushless permanent-magnet machines*. Oxford: Clarendon Press, 2010.

HOLMAN, J. P. *Heat transfer*. 10th ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

HUGHES, A.; DRURY, B. *Electric motors and drives: fundamentals, types and applications*. 4th ed. Newnes, 2013.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 8th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Introduction to heat transfer*. 4th ed. John Wiley & Sons, 2008.

KÁRMÁN, T. von. Über die laminare und turbulente Reibung. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, v. 1, n. 4, p. 233–252, 1921. (Note: Corrected the author's name and added the original title for accuracy.)

KAYS, W. M.; LONDON, A. L. *Compact heat exchangers*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1998.

KLEINSTREUER, C. *Engineering fluid dynamics: an interdisciplinary systems approach*. Cambridge University Press, 2010.

LAVOISIER, A. L. *Traité élémentaire de chimie*. Paris: Chez Cuchet, 1789.

MALDONADO, M. G.; MELGOSA, M. A.; HONORATO, J. A.; PRIETO, J. I.; ROMERO, J. J. Thermal analysis of an electric vehicle traction motor using computational fluid dynamics. *Applied Thermal Engineering*, v. 165, p. 114569, 2020.

MATHWORKS. *MATLAB documentation: ordinary differential equations*. 2024. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/math/ordinary-differential-equations.html>. Acesso em: 15 abr. 2025.

MAXWELL, J. C. Illustrations of the dynamical theory of gases. *Philosophical Magazine*, v. 19, n. 124, p. 19–32, 1860.

MODEST, M. F. *Radiative heat transfer*. 3rd ed. Academic press, 2013.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H.; HUEBSCH, P. M.; ROTHMAYER, W. W. *Fundamentals of fluid mechanics*. 7th ed. John Wiley & Sons, 2013.

NEWTON, I. Scala graduum caloris & caloris descriptiones. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 22, p. 824–829, 1701.

PATIL, V. C.; TANDALE, M. S.; JADHAV, S. V.; BHOSALE, C. H.; PATIL, P. P. Numerical simulation and optimization of cooling system for electric vehicle inverter. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 164, p. 106927, 2021.

PATTERSON, D.; HOKE, A. Motor cooling system design for electric vehicles. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, v. 4, n. 1, p. 439–446, 2011.

PERRY, Robert H.; GREEN, Don W.; MALONEY, James O. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 1997.

PETERS, M.; JANG, S. P.; KIM, S. J.; KWON, C. J.; JANG, H. D. Thermal conductivity enhancement of nanofluids with various nanoparticles. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 35, p. 127-135, 2016.

PESARAN, A. A. et al. Thermal performance of lithium-ion batteries for electric-drive vehicles. *Advanced Thermal Management Materials*, v. 2, p. 275–300, 2013.

PROMILITARES. *Veículo formula SAE elétrico*. 2025. Disponível em: <<https://www.promilitares.com.br/forum/viewtopic.php?t=15858>>. Acesso em: 02 março 2025.

RAYLEIGH, L. On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side. *Philosophical Magazine*, v. 32, n. 192, p. 529–546, 1916.

SAE International. *SAE Internacional*. 2024. Disponível em: <<https://www.sae.org/participate/formula-sae>>. Acesso em: 02 março 2025. (Note: I've corrected the organization name and adjusted the URL to the general Formula SAE page, as the original URL may not be stable.)

SANTOS, L. A. et al. Numerical simulation of the thermal behavior of an electric motor for automotive application. *SAE International Journal of Engines*, v. 14, n. 4, p. 263–272, 2021.

SEVCON. *Inversor Sevcon*. 2025. Disponível em: <<https://www.sevcon.com/>>. Acesso em: 02 março 2025.

SIEGEL, J. B.; HOWELL, D. A. *Thermal management of electric vehicle battery systems by phase change materials*. Springer, 2016.

STEFAN, J. Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, v. 79, p. 391–428, 1879.

THOMPSON, B. An inquiry concerning the source of the heat which is excited by friction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 88, p. 80–118, 1798.

TIAN, Y.; ZHANG, Y.; QU, Z.; LU, J.; LI, Z.; LI, Q. Recent advances in thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energy*, v. 194, p. 116865, 2020.

UFJF. *Trocadores de calor*. 2025. Disponível em: <www.ufjf.br/engmecanica/files/2010/12/Aula-8-Trocadores-de-Calor.pdf>. Acesso em: 07 março 2025.

WHITE, F. M. *Fluid mechanics*. 7th ed. McGraw-Hill Education, 2011.

YASA. *Motor YASA 750R*. 2025. Disponível em: <<https://yasa.com/>>. Acesso em: 10 março 2025.

MERCADO LIVRE. *Bomba Submersa Elétrica*. 2025. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1100780209-bomba-submersa-eletrica-p-agua-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=e783a542-d079-4a4f-9a1c-59eae4e6a8b7>. Acesso em: 10 março 2025.