

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI  
BRUNO RIBEIRO E SILVA  
CAROLINA VALÉRIO  
GUILHERME POLETTI DE ANDRADE  
HUMBERTO GUTIERREZ PORTO  
JOÃO VICTOR FERREIRA TORRES PENEDO  
LETÍCIA SAYURI MINATOGAWA  
LUÍS FELIPE BARRETO DELGADO  
MATHEUS SOTTO BARBANTI

**B.COOLER:** Sistema de arrefecimento de baterias para o FSAE FEI Elétrico

São Bernardo do Campo

2022

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI  
BRUNO RIBEIRO E SILVA  
CAROLINA VALÉRIO  
GUILHERME POLETTI DE ANDRADE  
HUMBERTO GUTIERREZ PORTO  
JOÃO VICTOR FERREIRA TORRES PENEDO  
LETÍCIA SAYURI MINATOGAWA  
LUÍS FELIPE BARRETO DELGADO  
MATHEUS SOTTO BARBANTI

**B.COOLER:** Sistema de arrefecimento de baterias para o FSAE FEI Elétrico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica Automobilística. Orientado pelo Prof. Francisco Lameiras.

São Bernardo do Campo

2022

B.Cooler : Sistema de arrefecimento para as baterias do fórmula FEI elétrico / Bruno Ribeiro e Silva...[et al.]. São Bernardo do Campo, 2022.

126 p. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Me. Francisco Lameiras Júnior.

Coorientador: Prof. Dr. Cyro Albuquerque Neto.

1. Arrefecimento. 2. Bateria. 3. BTMS. 4. Veículo elétrico. 5. LiPo. I. Silva, Bruno Ribeiro e. II. Valério, Carolina. III. de Andrade, Guilherme Poletti. IV. Porto, Humberto Gutierrez. V. Penedo, João Victor Ferreira Torres. VI. Minatogawa, Letícia Sayuri. VII. Delgado, Luís Felipe Barreto. VIII. Barbanti, Matheus Sotto. IX. Júnior, Francisco Lameiras, orient. X. Título.

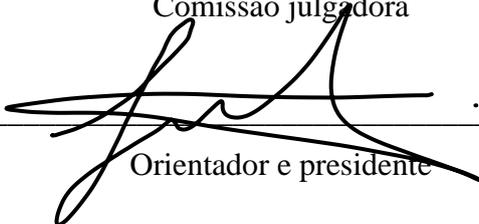
Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI  
BRUNO RIBEIRO E SILVA  
CAROLINA VALÉRIO  
GUILHERME POLETTI DE ANDRADE  
HUMBERTO GUTIERREZ PORTO  
JOÃO VICTOR FERREIRA TORRES PENEDO  
LETÍCIA SAYURI MINATOGAWA  
LUÍS FELIPE BARRETO DELGADO  
MATHEUS SOTTO BARBANTI

**B.COOLER:** Sistema de arrefecimento de baterias para o FSAE FEI Elétrico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica Automobilística. Orientado pelo Prof. Francisco Lameiras.

Comissão julgadora



---

Orientador e presidente

---

Examinador (1)

---

Examinador (2)

São Bernardo do Campo

2022

Este trabalho é dedicado aos familiares e amigos dos membros do grupo, que estiveram presentes ao longo dessa jornada, dando suporte e nutrindo nossa vontade de superar desafios. Nossos mais sinceros agradecimentos.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus, por ter permitido que chegássemos até aqui com muita saúde e pela resiliência que nos permitiu vencer todos os obstáculos encontrados ao longo dessa jornada.

Aos nossos familiares, nossa eterna gratidão por todo apoio, por toda ajuda, confiança e que nos incentivaram em momentos difíceis ao longo do caminho em busca dos nossos sonhos e compreenderam nossa ausência durante esse período.

Ao nosso orientador, Prof. Me. Francisco Lameiras Júnior pela dedicação, direcionamentos, compreensão, e encorajamento para com o grupo.

Aos coorientadores, Prof. Dr. Cyro Albuquerque Neto, Prof. Dr. Fábio Delatore e Me. Rafael Serralvo Neto pela paciência, atenção, conhecimentos compartilhados com o grupo e contribuição no desenvolvimento do nosso projeto.

Aos membros da Equipe FSAE FEI Elétrico, que nos receberam, forneceram dados e informações, ensinamentos, nos passaram a visão, objetivos, restrições e foram sempre muito solícitos, atenciosos e pacientes. A determinação deles nos serve de inspiração.

A todo o corpo docente da FEI que fez parte de nossa formação, aos que se envolveram no desenvolvimento do projeto, professores que participaram como avaliadores nas prévias, pelos apontamentos e conselhos para melhoria contínua do trabalho.

Agradecemos ao Centro Universitário FEI, pelas ferramentas e estrutura, por nos acolher e preparar; a todos os funcionários, direção e administração que auxiliaram em nosso desenvolvimento ao longo dos anos e foram essenciais no nosso processo de formação.

“Transforme as pedras que você tropeça nas pedras de sua escada.”

Sócrates

## RESUMO

Atualmente existe uma grande conscientização ambiental em relação aos veículos. Duas das principais megatendências do Fórum Econômico Mundial são: escassez de recursos naturais e o avanço das tecnologias; é razoável afirmar que, nas próximas décadas, muitas decisões, visões, diretrizes e formas de viver serão baseadas nestes processos globais chamados de megatendências. A procura por métodos mais eficientes, econômicos e limpos de fornecer energia cresce a cada ano, e com isso, as baterias de íons de lítio se tornaram uma resposta comum em diversos nichos da mobilidade.

O trabalho de conclusão de curso a seguir, tem a finalidade de explorar os efeitos de um sistema de arrefecimento que promova trocas de calor mais eficientes para o ciclo de trabalho de baterias de Lítio. O B.Cooler é um sistema capaz de promover condições de uso melhores para as baterias de veículos elétricos leves e, através do Fórmula FEI Elétrico, foram realizados testes e simulações para desenvolver as ideias propostas e obter análises e resultados sobre os impactos de tais inovações.

**Palavras-chave:** Arrefecimento, bateria, Lítio,  $\text{Li}^+$ , LiPo, veículo elétrico, EV, mobilidade, sistema de controle térmico da bateria, BTMS, eficiência, temperatura, troca térmica, autonomia, sustentabilidade.

## ABSTRACT

The environmental consciousness related to vehicles has increased greatly lately. Two main megatrends from the World Economic Forum are: scarcity of natural resources and the advance of technologies; it is reasonable to affirm that in the next few decades, many decisions, perspectives, guidelines, and lifestyles will follow the global processes called megatrends. The search for more efficient, economical, and clean methods to supply energy expands yearly, and with that, lithium-ion batteries have become a common answer for several niches of mobility.

The following work has the purpose to explore the effects of a cooling system that promotes more efficient heat exchanges for the work cycle of lithium-ion batteries. B.Cooler is a system capable of promoting more suitable work conditions to light vehicle batteries and, through FSAE FEI Electric, tests and simulations were conducted in order to develop the ideas proposed and to obtain the analysis and results of the impacts of such innovations.

**Key Words:** Cooling, battery, Lithium, Li<sup>+</sup>, LiPo, electric vehicle, EV, mobility, battery thermal management system, BTMS, efficiency, temperature, thermal exchange, autonomy, sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo RB9 da Equipe FSAE FEI Elétrico .....	17
Figura 2 – Queda de tensão pelo tempo em diferentes temperaturas .....	21
Figura 3 – Teste de longevidade de EVs em cidades diferentes .....	22
Figura 4 – Curva de descarga de uma célula de Li+ na taxa 1C, variando a temperatura .....	23
Figura 5 – Taxa de geração de calor versus taxa de descarga .....	24
Figura 6 – Geração de calor em função da profundidade de descarga .....	25
Figura 7 – Zonas de geração de calor conforme o DOD .....	26
Figura 8 – Influência do método de arrefecimento na geração de calor da célula .....	27
Figura 9 – Diagrama de Ishikawa.....	29
Figura 10 – Os 5 Porquês .....	30
Figura 11 – Golden Circle projeto B.Cooler .....	32
Figura 12 – Maiores fabricantes de EVs plug-in no 1º semestre de 2021 .....	35
Figura 13 – PI EVs mais vendidos no mundo no 1º semestre de 2021 .....	35
Figura 14 – Maiores fabricantes de baterias.....	36
Figura 15 – Queda de temperatura de acordo com o tipo de convecção no ar.....	38
Figura 16 – Curvas de aquecimento de diferentes fluidos de arrefecimento.....	39
Figura 17 – Características da água em função da concentração de etilenoglicol .....	40
Figura 18 – Impacto do PCM em relação à ventilação sob taxa de descarga de 3A.....	41
Figura 19 – Impacto do PCM em relação à ventilação sob taxa de descarga de 10A.....	42
Figura 20 – Coeficiente de transferência de calor da água e do gálio .....	43
Figura 21 – Comparação entre água e metal líquido como fluidos de troca térmica .....	44
Figura 22 – Etapas de funcionamento do sistema .....	46
Figura 23 – Boundary Diagram.....	47
Figura 24 – Diagrama - P .....	51
Figura 25 – Método SCAMPER.....	53
Figura 26 – Matriz Morfológica .....	54
Figura 27 – Modelos considerados.....	55
Figura 28 – Componentes dos modelos considerados.....	55
Figura 29 – Gráfico de corrente versus tempo em uma volta no ECPA .....	64
Figura 30 – Simulação do comportamento térmico de uma célula .....	66
Figura 31 – Simplificação da geometria dos componentes internos do container .....	68
Figura 32 – Condições de ventilação simuladas.....	69
Figura 33 – Propriedades do ar no Ansys.....	70
Figura 34 – Propriedades dos materiais dos componentes da bateria no Ansys .....	70
Figura 35 – Velocidade do ar: referência, 15°C e 1 m/s.....	78
Figura 36 – Temperatura: referência, 15°C e 1 m/s .....	79
Figura 37 – Fluxo de calor: referência, 15°C e 1 m/s.....	80
Figura 38 – Coeficiente de transferência de calor nas paredes: referência, 15°C .....	81
Figura 39 – Temperatura: referência, 25°C e 1 m/s .....	82
Figura 40 – Fluxo de calor: referência, 25°C e 1 m/s.....	83
Figura 41 – Coeficiente de transferência de calor nas paredes: referência, 25°C .....	84
Figura 42 – Temperatura: referência, 35°C e 1 m/s .....	85

Figura 43 – Fluxo de calor: referência, 35°C e 1 m/s.....	86
Figura 44 – Coeficiente de transferência de calor nas paredes: referência, 35°C .....	87
Figura 45 – Velocidade do ar entrando a 1 m/s e 15°C.....	88
Figura 46 – Temperatura: perfil alinhado a 15°C e 1 m/s .....	89
Figura 47 – Fluxo de calor e coeficiente de transferência de calor: alinhado, 15°C.....	90
Figura 48 – Velocidades do ar para entrada de 6,17 e 10 m/s, layout alinhado, 25°C.....	91
Figura 49 – Temperatura: entrada a 6,17 e 10 m/s, layout alinhado, 25°C.....	92
Figura 50 – Fluxo de calor e coeficiente de transferência de calor, 6,17 e 10 m/s, 25°C .....	93
Figura 51 – Temperatura das células para as entradas de 6,17 e 10 m/s, 35°C.....	94
Figura 52 – Fluxo de calor e coeficiente de transferência de calor, alinhado 35°C .....	95
Figura 53 – Comparação dos efeitos dos perfis na temperatura da bateria, 25°C.....	98
Figura 54 – Comparação dos efeitos dos perfis na temperatura da bateria, 35°C.....	99
Figura 55 – Precificação dos Itens.....	101
Figura 56 – Investimento Inicial.....	102
Figura 57 – Seção simulada do container com o perfil de ventilação em “Z” .....	104
Figura 58 – Velocidade: perfil em “Z” ar a 25°C, entrada a 6,17 m/s .....	105
Figura 59 – Temperatura: perfil em “Z” ar a 25°C, entrada a 6,17 m/s .....	105
Figura 60 – Coeficiente de troca de calor: perfil “Z”, ar a 25°C, entrada a 6,17 m/s .....	106
Figura 61 – Velocidade: perfil em “Z” ar a 35°C, entrada a 10 m/s .....	107
Figura 62 – Temperatura: perfil em “Z” ar a 35°C, entrada a 10 m/s .....	108
Figura 63 – Comparação entre os perfis em “Z” e alinhado, a 25°C .....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferentes métodos de arrefecimento para o mesmo ganho de temperatura .....	44
Tabela 2 – Matriz de Decisão dos Fluidos de Arrefecimento .....	45
Tabela 3 – Comparação das propriedades físicas térmicas de diferentes fluídos.....	46
Tabela 4 – Componentes do Sistema.....	48
Tabela 5 – Análise de Valor .....	49
Tabela 6 – Matriz de decisão dos modelos.....	56
Tabela 7 – Especificações técnicas das ventoinhas selecionadas.....	57
Tabela 8 – Especificações técnicas do controlador selecionado .....	57
Tabela 9 – Especificações técnicas do sensor de temperatura selecionado.....	57
Tabela 10 – Referência de tempo em cada faixa de corrente .....	64
Tabela 11– Propriedades do ar a 1 atm de pressão.....	73
Tabela 12 – Determinação do tipo de escoamento pelo número de Reynolds .....	74
Tabela 13– Número de Nusselt médio para convecção forçada em escoamento cruzado .....	75
Tabela 14 – Valores de Reynolds, Prandtl e coeficiente de convecção para as condições .....	77
Tabela 15 – Valores obtidos nas simulações do layout de referência .....	96
Tabela 16 – Valores obtidos nas simulações do layout alinhado .....	97
Tabela 17– Temperaturas: referência (1 m/s) e alinhado (6,17 e 10 m/s), ar a 25°C.....	97
Tabela 18 – Velocidades: referência (1 m/s) e alinhado (6,17 e 10 m/s), ar a 25°C .....	98
Tabela 19 – Temperaturas: referência (1 m/s) e alinhado (1 e 6,17 m/s), ar a 35°C.....	99
Tabela 20 – Valores obtidos nas simulações do layout em “Z” .....	108
Tabela 21 – Temperaturas: alinhado e em “Z” (6,17 e 10 m/s), ar a 25°C .....	109
Tabela 22 – Velocidade: alinhado e em “Z” (6,17 e 10 m/s), ar a 25°C .....	109

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMS	Accumulator Management System
ARC	Accelerating Rate Calorimeter
AVL	Vehicle System and Driveline Analysis
BMS	Battery Management System
BTMS	Battery Thermal Management System
CAD	Computer Aided Design
CTC	Coefficiente de troca de calor nas paredes dos conjuntos de células
ECPA	Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo
EV	Electric Vehicle
FC	Fluxo de calor nos conjuntos de células
FEI	Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros
FSAE	Fórmula SAE
GEM	Global Electric Motorcars
GM	General Motors
IEC	International Electrotechnical Commission
IEA	International Energy Agency
ISO	International Organization for Standardization
LiPo	Lithium-Polymer
NBR	Norma Brasileira
PCM	Phase Changing Material
ROI	Return Over Investment (Retorno Sobre o Investimento)
SAE	Society of Automotive Engineers
SPTrans	São Paulo Transporte S/A
T	Temperatura superficial nos conjuntos de células
V	Velocidade do ar escoando
VE	Veículo Elétrico
VW	Volkswagen

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	16
1.1	FÓRMULA FEI ELÉTRICO	16
1.2	TIPOS DE BATERIAS	17
1.3	FUNCIONAMENTO DAS BATERIAS DE LÍTIO	18
<b>2</b>	<b>PROBLEMATIZAÇÃO</b>	19
2.1	OPORTUNIDADE DE MELHORIA	20
2.2	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA	20
<b>2.2.1</b>	<b>Impacto da temperatura no ciclo de vida da bateria</b>	21
<b>2.2.2</b>	<b>Diagrama de descarga de uma célula de lítio</b>	23
<b>2.2.3</b>	<b>Geração de calor em células de íon de lítio</b>	24
2.3	CAUSA RAIZ: DIAGRAMA DE ISHIKAWA	27
2.4	CAUSA RAIZ: OS 5 PORQUÊS	29
2.5	GUIDELINE DO PROJETO: GOLDEN CIRCLE	31
2.6	ANÁLISE DE VIABILIDADE	32
2.7	NORMAS TÉCNICAS, DE SEGURANÇA E LEGISLAÇÃO	33
2.8	REQUISITOS DE ENGENHARIA	34
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DE MERCADO</b>	34
3.1	DEMANDA POR VEÍCULOS ELÉTRICOS NO MUNDO	34
3.2	FABRICANTES DE BATERIAS	36
<b>4</b>	<b>FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE ENGENHARIA</b>	37
4.1	PROPOSTAS PARA O FLUIDO DE ARREFECIMENTO	37
4.2	STORYBOARD	46
4.3	BOUNDARY DIAGRAM	47
4.4	ENGENHARIA REVERSA	48
4.5	ANÁLISE DE VALOR	49
4.6	ANÁLISE FUNCIONAL: FAST	49
4.7	P-DIAGRAM	51
4.8	FERRAMENTAS DE INOVAÇÃO	52
<b>4.8.1</b>	<b>Scamper</b>	52
<b>4.8.2</b>	<b>Matriz morfológica</b>	53
4.9	MODELOS CONSIDERADOS	54
4.10	MATRIZ DE DECISÃO DOS MODELOS	55
4.12	FMEA	58
4.13	CANVAS DE NEGÓCIO	59
<b>4.12.1</b>	<b>Seguimentos de clientes</b>	60
<b>4.12.2</b>	<b>Oferta de valor</b>	60

4.12.3	<b>Canais</b>	60
4.12.4	<b>Relacionamento com o cliente</b>	60
4.12.5	<b>Fontes de receitas</b>	60
4.12.6	<b>Recursos chave</b>	60
4.12.7	<b>Atividades chave</b>	60
4.12.8	<b>Parceiros chave</b>	61
4.12.9	<b>Estrutura de custos</b>	61
4.13	CANVAS DE PROJETO	61
5	<b>CÁLCULO DA MELHORIA PROPOSTA</b>	62
5.1	TARGET	63
5.2	PROCEDIMENTOS DAS SIMULAÇÕES	65
5.2.1	<b>Procedimento adotado</b>	65
5.2.2	<b>Simulação do funcionamento de uma célula</b>	66
5.3	MODELAMENTO MATEMÁTICO	71
5.3.1	<b>Descrição dos modelos</b>	71
5.3.2	<b>Cálculos</b>	71
5.4	COMPARAÇÃO DA MELHORIA COM O TARGET	77
5.4.1	<b>Simulações do layout de referência</b>	77
5.4.1.1	<i>Referência a 15°C e 1 m/s</i>	77
5.4.1.2	<i>Referência a 25°C e 1 m/s</i>	81
5.4.1.3	<i>Referência a 35°C e 1 m/s</i>	84
5.4.2	<b>Simulações do layout alinhado com o ar a 15°C</b>	87
5.4.3	<b>Simulações do layout alinhado com o ar a 25°C</b>	91
5.4.4	<b>Simulações do layout alinhado com o ar a 35°C</b>	93
5.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	95
5.6	CONCLUSÕES	100
6	<b>CUSTOS</b>	100
6.1	PRECIFICAÇÃO DOS ITENS	100
6.2	ANÁLISE ECONÔMICA	101
7	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	102
	<b>REFERÊNCIAS</b>	110
	<b>APÊNDICE 1 - DIMENSIONAMENTO CONTROLADOR</b>	116
	<b>APÊNDICE 2 - DIMENSIONAMENTO VENTONHA</b>	118
	<b>APÊNDICE 3 - DIMENSIONAMENTO TERMISTOR</b>	120
	<b>APÊNDICE 4 - FMEA</b>	122
	<b>APÊNDICE 5 - BUSINESS MODEL CANVAS</b>	124
	<b>APÊNDICE 6 - CANVAS DE PROJETO</b>	126

# 1 INTRODUÇÃO

Devido à necessidade de encontrar fontes de energia mais limpas para a mobilidade e promover um futuro mais sustentável, diversas montadoras como Volvo, GM, VW e Audi anunciaram que pretendem encerrar a produção de veículos a combustão até a próxima década. Diversos players do varejo, e-commerce, serviços de entrega e postagens no mundo todo, se movimentam para eletrificar suas frotas.

De fato, a revolução tecnológica é um dos maiores contribuintes para as mudanças no powertrain dos veículos. O aumento nas vendas de veículos elétricos e híbridos também se deve por leis governamentais que têm estabelecido restrições de emissões e prazos para o fim da produção de veículos a combustão, obrigando as montadoras a desenvolverem veículos de acordo com as novas diretrizes. Projeta-se que o investimento em tecnologias que apoiem a eletrificação de veículos em massa reduza os preços e aumente a adoção.

Algumas previsões da indústria sugerem que os veículos elétricos representarão mais da metade das vendas globais na maioria dos segmentos de veículos até 2035. Políticas governamentais de descarbonização e programas de incentivo de veículos elétricos serão fundamentais para a difusão deste modo de mobilidade.

Alguns fatores dificultam a eletrificação, como as atualizações de infraestrutura de rede elétrica e de carregamento e o custo da produção das baterias de íon lítio. As baterias possuem alcances de viagem limitados e o tempo necessário para carregá-las também é um desafio. Além disso, são muito sensíveis às mudanças de temperatura frequentes e isso afeta a vida útil da bateria. Outra adversidade relacionada é que durante o seu uso operando fora do intervalo de temperatura adequado, prejudica sua eficiência e danifica sua estrutura.

## 1.1 FÓRMULA FEI ELÉTRICO

A SAE promove uma competição para fomentar o interesse e desenvolvimento de tecnologias com possibilidades de aplicações reais, conhecida como FSAE ou Fórmula Estudantil. Assim como outras categorias de automobilismo, soluções encontradas pelas equipes durante as competições podem ser aplicadas aos carros de rua, e tais soluções desenvolvidas nas competições, quando trazidas às ruas, podem resultar em melhorias que causam impactos na indústria global e tem potencial disruptivo nos padrões de produção.

Para equalizar as condições de competição e deixar os carros semelhantes, cria-se um regulamento, que impede certas características ou mudanças, mas deixa lacunas que

possibilitam que cada equipe desenvolva soluções próprias. Cada time busca resolver problemas e desafios de maneira a obter uma vantagem em relação aos competidores, mas sem quebrar as regras; uma maneira possível identificada é melhorar o sistema de arrefecimento das baterias, a fim de permitir que trabalhem em regime otimizado por mais tempo, o que resulta em ganhos na autonomia, longevidade, desempenho e confiabilidade do conjunto. Esse é o objetivo.

Figura 1 – Modelo RB9 da Equipe FSAE FEI Elétrico



Fonte: Equipe FSAE FEI Elétrico, 2021

## 1.2 TIPOS DE BATERIAS

Baterias são divididas em dois tipos: primárias e secundárias. As secundárias são recarregáveis, enquanto as primárias, uma vez que se encontram descarregadas, não podem ser recarregadas. A seguir, estão listadas alguns dos tipos de baterias secundárias mais usadas na indústria automobilística.

Iniciando pelo tipo mais comum atualmente, as baterias de Chumbo-ácido, presentes em todos os carros com motores à combustão de hoje e apresentam uma densidade de energia de 30 a 40 Wh/kg.

As baterias de Níquel-Cádmio são geralmente chamadas de alcalinas, são bem comuns nos formatos de pilhas AA e AAA, e muito usadas nos telefones sem fio, existem há bastante

tempo e têm baixo custo de produção; além disso tem a vantagem de não sofrerem sobrecarga e terem uma densidade de energia um pouco maior que a das baterias de chumbo-ácido.

Baterias de Níquel-Metal Hidreto (ou hidreto metálico de níquel) são conhecidas por serem mais recicláveis que outras baterias e terem baixo custo de produção; amplamente usadas nos veículos híbridos da Toyota, e no Ford Fusion Hybrid, baterias de Ni-MH costumam ter mais que o dobro de densidade de energia que baterias de chumbo-ácido.

Baterias de íon-lítio são consideradas atualmente como as melhores para aplicação em veículos elétricos por terem alta densidade de energia (entre 100 e 200 Wh/kg), ou seja, alta capacidade de armazenar energia em volumes pequenos. São muito usadas em smartphones e notebooks e equipam a maioria dos veículos totalmente elétricos.

Baterias de Lítio-Polímero são uma variação das baterias de íon-Lítio, se diferenciando no formato da célula (as baterias de  $\text{Li}^+$  são geralmente cilíndricas, como as pilhas comuns, enquanto as de LiPo são encontradas em formatos prismáticos e geralmente são um pouco maleáveis) e no eletrólito, que é o meio de transferência de íons entre os polos da bateria (as de LiPo têm eletrólitos de gel de sal de lítio absorvido numa matriz polimérica condutora). Apresentam densidade energética superior à das baterias de  $\text{Li}^+$  e são encontradas, por serem leves, em drones, smartphones, notebooks e no Fórmula SAE FEI Elétrico.

### 1.3 FUNCIONAMENTO DAS BATERIAS DE LÍTIO

A melhor forma de se armazenar energia elétrica é pelo uso de baterias. Usa-se o potencial eletroquímico dos elementos para obter energia elétrica por meio de reações químicas. Atualmente, as melhores utilizam o Lítio no eletrodo negativo por ser um metal alcalino com baixa densidade e alto potencial eletroquímico, ou seja, libera elétrons com facilidade e tem peso baixo. O Lítio é um metal que, na sua forma pura, é instável por possuir alto potencial eletroquímico, que é a tendência de um metal de perder elétrons; ao se associar a outros elementos, o Lítio se torna estável e pode ser utilizado para a aplicação nas baterias. Durante o processo de carregamento da bateria, os elétrons se separam dos átomos de Lítio e se encaminham ao polo negativo, atraindo os átomos do metal; durante a descarga, o Lítio percorre se movimenta em direção ao anodo passando pelo eletrólito, enquanto os átomos percorrem o caminho dos cabos do sistema, gerando corrente elétrica. Além disso, baterias de Lítio não sofrem com o efeito memória, e mesmo estando sujeitas à perda de desempenho ao longo do tempo de uso, seu tempo de funcionamento é superior ao das concorrentes.

A diferença entre baterias de  $\text{Li}^+$  e LiPo é que na segunda, o eletrólito utilizado é um polímero semissólido de alta condutividade, em baterias de  $\text{Li}^+$  o eletrólito é líquido. Ambas necessitam de um separador que impede a passagem de elétrons (forçando-os a percorrer o caminho dos fios) prevenindo colapso por curto-circuito interno. Geralmente, em baterias de  $\text{Li}^+$ , o anodo é formado de camadas de grafite intercaladas por camadas de lítio.

Noa década de 1970, descobriu-se que sólidos com a capacidade de incorporar átomos ou moléculas em sua estrutura em caráter reversível, chamados de compostos de intercalação, poderiam ser utilizados como eletrodos em dispositivos eletrônicos usando o lítio.

Baterias de Lítio tem alta capacidade de armazenar energia, isso possibilita que células menores e em menor quantidade sejam usadas. Além disso, por terem baixa taxa de autodescarga, podem ser armazenadas por longos períodos. Em geral, baterias de LiPo possuem volume 20% menor que baterias de  $\text{Li}^+$  com mesma capacidade. Baterias de Lítio não sofrem com o efeito memória, conhecido como “bateria viciada”, o que eleva a longevidade das células. Metais pesados como Cádmio, Chumbo e Mercúrio não são utilizados, e por isso é considerada uma das baterias mais ecológicas, e de descarte mais simplificado.

Infelizmente, o custo de baterias de LiPo é superior ao da maioria das baterias, mesmo assim, as vantagens que elas trazem, são mais relevantes e se alinham perfeitamente ao projeto do FSAE FEI Elétrico. A bateria usada pela equipe FSAE FEI é do tipo LiPo; a célula tem o formato pouch e é fabricada pela Melasta. Algumas das características importantes são: Tensão de 3,7V; capacidade de 6,8 Ah, e vida útil superior a 100 ciclos de carga. Cada célula pesa cerca de 124,5g e todas juntas, somam pouco mais de 35kg.

## **2 PROBLEMATIZAÇÃO**

Uma habilidade fundamental de um bom engenheiro é a capacidade de problematização. Enxergar oportunidades em situações em que aparentemente não há melhorias, ou seja, identificar problemas mal estruturados.

Nem sempre os defeitos e imperfeições de um sistema ou equipamento se apresentam de maneira evidente, assim, fica a cargo do engenheiro observar quais parâmetros podem ser melhorados, equacionar o problema notado e propor um plano de ação para resolver ou amenizar as consequências da situação identificada.

Dessa forma, o grupo B.Cooler, observou uma condição de funcionamento das baterias que causa uma situação indesejável e muito comum para veículos elétricos: o aquecimento da

célula eleva sua temperatura para fora da faixa adequada, que causa queda de rendimento, autonomia, performance e longevidade.

## 2.1 OPORTUNIDADE DE MELHORIA

Partindo da situação problemática em que células funcionam fora da faixa de temperatura que as proporcionam melhor eficiência, o projeto tem como finalidade desenvolver um sistema de arrefecimento que mantenha a bateria operando, em temperaturas que favoreçam o seu trabalho, durante o maior tempo possível, seja durante a carga ou descarga.

## 2.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

O bom funcionamento de qualquer bateria está estritamente ligado à temperatura, e cada tipo de bateria tem um intervalo de temperatura que permite seu melhor funcionamento; onde ela é mais eficiente, entrega carga da melhor forma e a degradação é minimizada.

Uma bateria muito fria pode ter redução na capacidade de recarga, precisando de mais tempo para carregar e ter sua capacidade permanentemente reduzida. Devido à dificuldade de movimentação dos elétrons, corrente, tensão e resistências são alteradas e prejudicam a entrega de energia.

O excesso de calor também prejudica seu funcionamento. A resistência elétrica da maioria dos metais aumenta com o calor. Temperaturas altas podem aumentar a chance de curto-circuito, causam diminuição da autonomia e desempenho e em casos mais severos, causam a degradação do eletrólito, que é o meio de condução dos elétrons, e isso pode causar a avalanche térmica (*thermal runaway*), que é o ganho de temperatura descontrolado, que provoca curto-circuito interno, derretimento de estruturas da bateria e dos eletrodos e perda da célula.

A fabricante da bateria, Melasta, recomenda o intervalo entre 0° e 60° C para o bom funcionamento das baterias durante as cargas e descargas, de forma a evitar os problemas mencionados. Al-Zareer (2017), Deng (2018), Koyama (2019), Yang (2016) entre outros, apontam que o intervalo de temperatura mais adequado para o funcionamento de células de lítio para a aplicação automotiva é de cerca de 15°C a 35°C, isso porque há menos chances de degradação do meio eletrolítico e de outros componentes internos das células que, ao se deteriorarem, podem provocar condições indesejadas como as vistas anteriormente. Visto que tal intervalo é amplamente aceito no meio automotivo e representa melhores condições que o proposto pelo fabricante, o projeto apresentado terá como referência justamente esta variação de temperatura, e o objetivo é manter as células operando nessa faixa de temperatura.

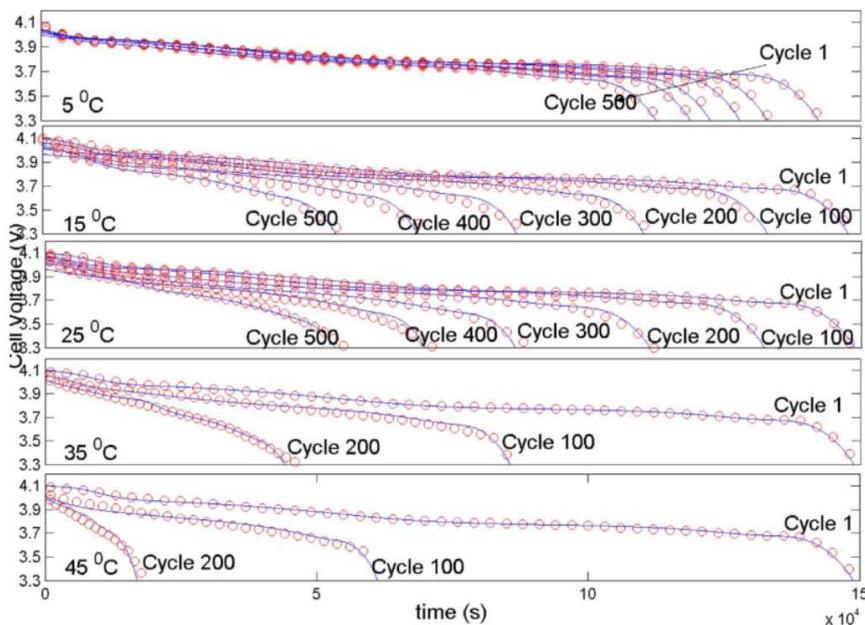
### 2.2.1 Impacto da temperatura no ciclo de vida da bateria

Os efeitos da temperatura na vida da célula, provocados por excesso de temperatura e ciclos intensos de trabalho, como visto anteriormente, são catastróficos e perceptíveis imediatamente se as condições forem extremas. Para casos menos intensos, quando a bateria funciona em temperaturas ligeiramente fora da faixa recomendada, ou não possuem um BTMS adequado, os efeitos só são notados a longo prazo. O proprietário de um EV pode passar anos operando seu veículo em condições desfavoráveis para a célula, causando danos leves, porém irreparáveis, e nem se dar conta disso.

Ao operar fora das condições favoráveis, o processo de degradação das células se intensifica, e reduz, significativamente a vida útil da bateria e prejudica o modo como ela funciona durante cada ciclo de trabalho. Ao longo do tempo, a necessidade de se recarregar o veículo se torna mais frequente, a autonomia é reduzida e a performance do veículo, em geral, diminui.

O emprego de um BTMS adequado permite que a bateria opere dentro das condições térmicas favoráveis por mais tempo, reduzindo a degradação da célula e permitindo que ela funcione melhor por mais tempo. Quando cada ciclo de trabalho é menos prejudicial às células, o tempo de vida útil aumenta e o investimento feito num EV, seja qual for o porte, se torna mais razoável.

Figura 2 – Queda de tensão pelo tempo em diferentes temperaturas

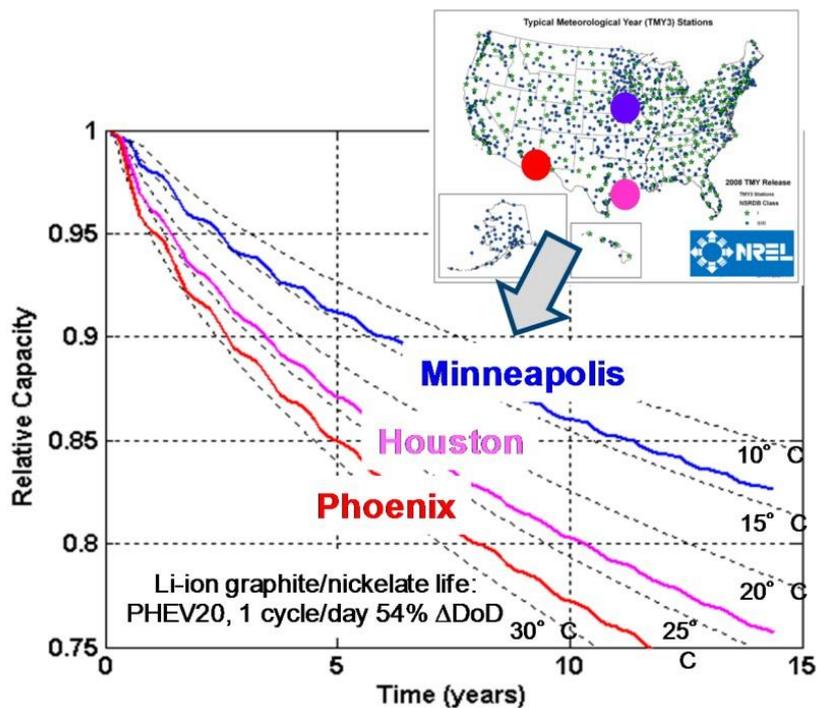


Pode-se observar na Figura 1, que com o aumento da temperatura, a tensão cai conforme os ciclos de trabalho, ou seja, ao longo da vida da célula, a temperatura prejudica a entrega de tensão, o que torna o ciclo de trabalho mais curto a cada ciclo.

Vale ressaltar que a célula usada nos testes que deram origem ao gráfico da Figura 2, é diferente das células usadas no FSAE FEI Elétrico, e portanto, possuem faixas de temperatura adequada diferentes.

Outra maneira de se observar esse efeito de degradação acelerada devido à temperatura, é observar EVs usados em locais com temperaturas médias distintas. É o caso do teste mostrado na Figura 1, a seguir. 3 EVs com ciclos de trabalho semelhantes foram usadas em três cidades diferentes dos Estados Unidos da América e, em cada cidade, a temperatura média anual é diferente. O que se notou foi uma queda na capacidade relativa da bateria mais acentuada na cidade mais quente e menos evidente na cidade mais fria.

Figura 3 – Teste de longevidade de EVs em cidades diferentes

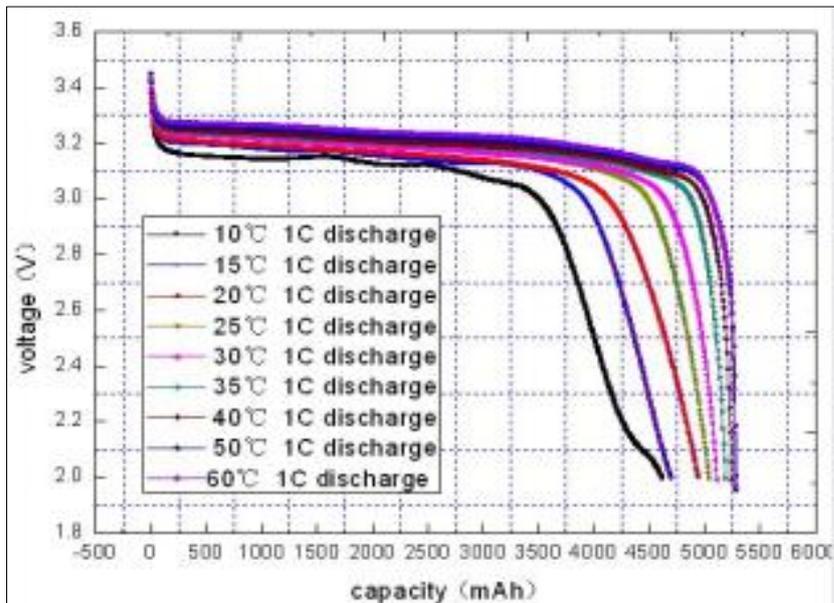


Fonte: International Battery Seminar, 2013

### 2.2.2 Diagrama de descarga de uma célula de lítio

Observando as curvas de descarga de uma célula, a uma taxa de 1C, em diferentes temperaturas, bem como os testes de bancada realizados, fica evidente a importância de uma célula operar dentro da faixa adequada de temperatura.

Figura 4 – Curva de descarga de uma célula de Li<sup>+</sup> na taxa 1C, variando a temperatura



Fonte: Autor “adaptado de” material de aula do Professor Gerhard Ett

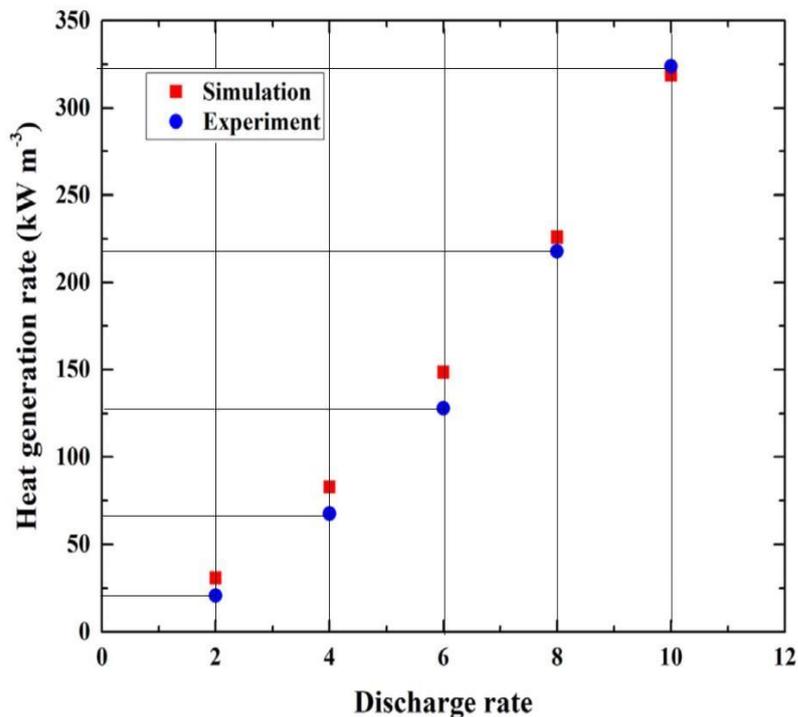
Na figura 3 é possível identificar três fases do processo de descarga da célula, são elas: a fase vertical, região de queda ôhmica, com a capacidade em 0 mAh e tensão máxima (~ 3,4 V), onde a resistência do meio eletrolítico prejudica a entrega de corrente; a fase horizontal, onde a queda de tensão é sutil, chamada de região de trabalho, favorável ao funcionamento da célula, e a final, onde há queda brusca de tensão e a capacidade alcança valores finais, onde ocorre o limite de difusão iônica, em que a alta concentração de íons reduz sua velocidade de movimentação no eletrólito. No início da descarga, assim como no final, onde as curvas são mais verticais, a bateria se encontra dentro do limite de difusão do lítio, onde o gradiente de concentração do íon Li<sup>+</sup> é baixo, levando à sua falta e, portanto, não são regiões recomendáveis de trabalho para as células. Ainda pode-se notar que são apresentadas curvas de descarga de uma célula, a uma taxa de 1C, em diferentes temperaturas, e por conta desta diferença de funcionamento, as curvas apresentam variações.

Pela observação do diagrama, nota-se que as curvas correspondentes às temperaturas mais altas sofrem uma queda mais brusca ao se aproximar dos 5250 mAh, enquanto as curvas de temperaturas mais baixas, apresentam quedas mais suaves, mas que se iniciam mais cedo. As

duas situações caracterizam funcionamento ineficiente da célula. Para temperaturas mais altas, as reações no interior da célula ocorrem mais rapidamente e com maior frequência. Isso pode levar a uma avalanche térmica e provocar a perda da célula e possíveis incêndios. Já para temperaturas mais baixas, a cinética diminui e provoca uma queda significativa na difusividade dos íons de Lítio, o que prejudica o funcionamento da célula. Temperaturas amenas garantem que a bateria não sofra com tais condições.

### 2.2.3 Geração de calor em células de íon de lítio

Figura 5 – Taxa de geração de calor versus taxa de descarga



Fonte: Autor “adaptado de” AN et al., 2019

No gráfico, observa-se que, para uma taxa de 6C, a célula produz cerca de 125 kW/m<sup>3</sup> de calor; e para uma taxa de 10C, a geração de calor é de 325 kW/m<sup>3</sup>.

Figura 6 – Geração de calor em função da profundidade de descarga

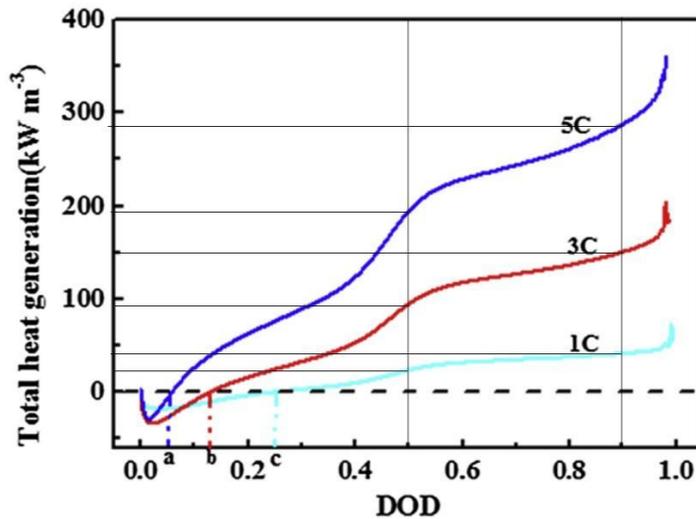
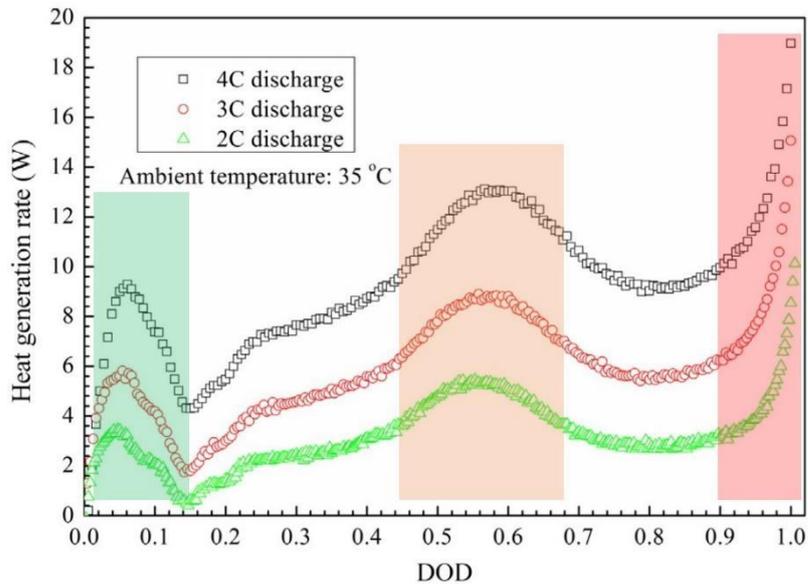


Fig. 11 – Total heat generation of the battery at discharge rates of 1 C, 3 C, and 5 C (point a, b, c is 0.057, 0.13, 0.22, respectively).

Fonte: Autor “adaptado de” LAI et al., 2015

No gráfico, pode-se obter o valor da taxa de calor pelo volume gerado a diferentes estados de descarga da célula. Para a DOD (*Depth of Discharge* – profundidade de descarga) de 50%, a célula produz, a uma taxa 1C de descarga, cerca de 25 kW/m<sup>3</sup>; para uma taxa de 3C, obtém-se cerca de 100 kW/m<sup>3</sup>, e para uma taxa de descarga de 5C, o calor gerado é aproximadamente 200 kW/m<sup>3</sup>. Para uma DOD de 90%, a 1C, o calor gerado é 40 kW/m<sup>3</sup>, a 3C é 150 kW/m<sup>3</sup>, e a 5C, gera-se cerca de 280 kW/m<sup>3</sup>.

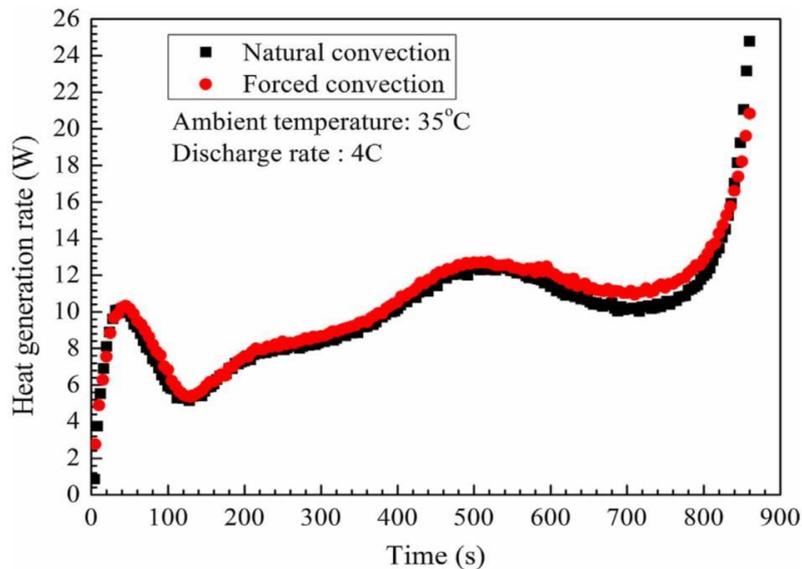
Figura 7 – Zonas de geração de calor conforme o DOD



Fonte: Autor “adaptado de” XIE et al., 2018

Conforme mostrado na Figura 3, a taxa de geração de calor no processo de descarga pode ser dividida em cinco etapas diferentes. Quando DOD é igual a 0,05, 0,55 e 1,0, respectivamente, três picos de geração de calor são observados, assim que o processo de descarga começa, a taxa de geração de calor aumenta rapidamente e atinge um valor de pico em DOD = 0,05 e quando isso ocorre, as taxas de pico para a descarga de 4C, 3C e 2C são 9,3 W, 5,8 W e 3,4 W, respectivamente. Quando  $0,05 < \text{DOD} < 0,55$ , a taxa de geração de calor diminui ligeiramente inicialmente, depois aumenta gradualmente e atinge o segundo pico em DOD = 0,55. Neste instante, as taxas de pico são 13,1 W, 8,7 W e 5,4 W durante a descarga de 4C, 3C e 2C, respectivamente. No momento em que o DOD varia de 0,6 a 0,9, a taxa de geração de calor diminui gradualmente e o processo de descarga está quase concluído (DOD > 0,9), a taxa de geração de calor aumenta acentuadamente e atinge o máximo no final do processo de descarga. As taxas máximas durante a descarga de 4C, 3C e 2C são 18,9 W, 15,0 W e 10,1 W, respectivamente. Consequentemente, o aumento acentuado da taxa de geração de calor facilmente fez com que a bateria ultrapassasse potencialmente sua temperatura permitida. Assim, a sobredescarga (DOD > 0,9) deve ser evitada nas aplicações práticas.

Figura 8 – Influência do método de arrefecimento na geração de calor da célula



Fonte: XIE *et al.*, 2018

A figura 4 apresenta a taxa de geração de calor calculada no processo de descarga de 4C à temperatura ambiente de 35 °C sob convecção forçada com vazão de ar de 18 m<sup>3</sup>/h e convecção natural. Como pode ser visto na figura 4, a variação da taxa de geração de calor para ambos os casos apresenta comportamento semelhante, o que indica que a forma de resfriamento tem influência insignificante na taxa de geração de calor da bateria. O desvio entre a convecção natural e a forçada durante o período de 600 a 800 segundos pode ser causado pela diferença da temperatura da bateria entre ambas as convecções. Assim conclui-se que a taxa de geração de calor depende apenas da temperatura da bateria, resistência CC e taxas de carga/descarga.

### 2.3 CAUSA RAIZ: DIAGRAMA DE ISHIKAWA

O Diagrama de Ishikawa é usado com a intenção de se obter a causa raiz do problema analisado. Utilizando-se de uma abordagem ampla, é possível encontrar inúmeros fatores que influenciam para a ocorrência do problema enfrentado, no caso deste estudo é a temperatura. O diagrama clássico tem 6 áreas principais que caracterizam problemas comuns dentro do sistema avaliado; são elas: meio-ambiente, mão-de-obra, material, máquina, método e medida. A versão usada apresenta adaptações que se adequam melhor ao sistema avaliado.

A primeira área que causa impacto no funcionamento das células é o meio-ambiente. A temperatura do ar, sua umidade, as condições e traçado da pista, bem como o tipo de prova a qual o carro será submetido têm impacto direto nas condições de funcionamento da bateria.

Uma prova árdua, naturalmente demandará mais trabalho da bateria, e esse esforço pode ser agravado por traçados com certas características (elevação, irregularidades, comprimento etc.) e por dias mais quentes e úmidos.

Em seguida, a influência do fluido de arrefecimento é evidente. Fluidos com características termodinâmicas que facilitam a troca de calor das células, conseguem mantê-las em temperaturas mais baixas. Assim, é necessário debater se a ventilação é a solução mais indicada ou se é necessário substituir o fluido de arrefecimento e, por consequência, todo o sistema. Como uma das condições de contorno do projeto é obter um sistema eficaz de arrefecimento mantendo o peso baixo do carro, que é um de seus maiores trunfos, a melhor opção volta a ser a ventilação. Apesar das propriedades termodinâmicas do ar não serem as mais indicadas para troca de calor, a baixa massa agregada tem relevância maior e assim, é necessário rever as condições geométricas para que a ventilação seja mais bem aproveitada.

Alinhada a essa análise, identifica-se que tanto o layout interno do pack como o próprio perfil do carro podem ser otimizados a fim de melhorar os efeitos da ventilação. As posições das ventoinhas de entrada e saída, disposição das células e barramentos, cabos e outros componentes internos ao pack poder ter grande impacto no fluxo de ar e, portanto, na eficiência das trocas de calor.

Um outro fator importante identificado foi a falha em adquirir dados precisos que indiquem quais os pontos fracos do carro e como se comporta sob diferentes condições. É do interesse da equipe que façam testes com as células e que conheçam suas características e necessidades; que testem o carro dinamicamente para avaliarem onde se encontram os pontos críticos.

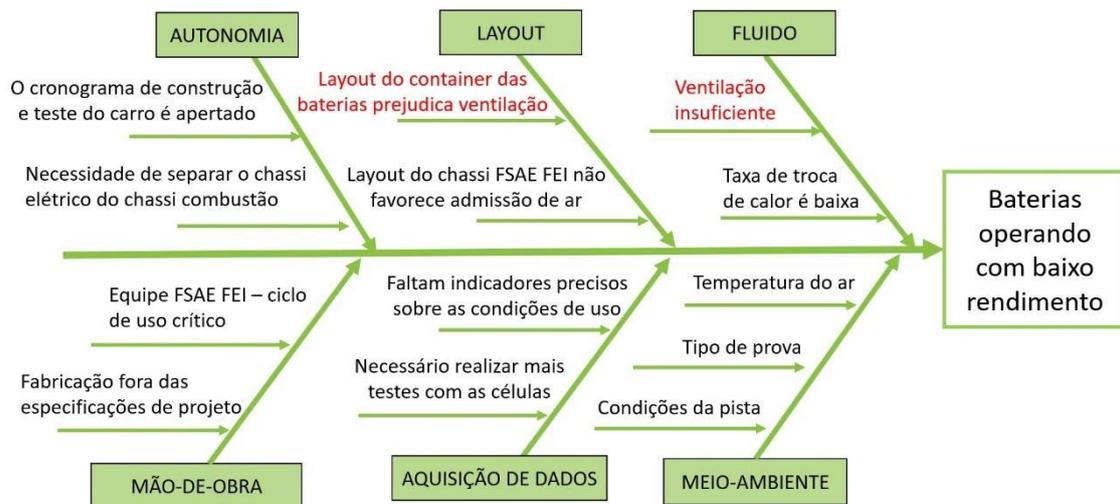
Devido à disparidade entre o carro elétrico e o carro movido a combustível, às diferenças entre os testes, competições, regulamento e comportamento dinâmico, entendeu-se que seria benéfico à equipe do FSAE FEI Elétrico que os projetos se desenvolvam de maneira independente, ou seja, que cada equipe pudesse desenvolver seus carros sem necessidade de compartilhar ou depender de recursos da outra. Atualmente, o carro elétrico usa o mesmo chassi que o modelo à combustão, e como visto antes, o modelo do carro prejudica o desempenho das baterias, e como os perfis são diferentes, o mais adequado seria um projeto novo adequado às demandas do projeto.

Finalmente, existe a possibilidade de que o fornecedor produza células que não atendem às especificações de projeto e de produção requeridas. Pode ocorrer também, imperícia por

parte da equipe ao lidar com as células, podendo armazená-las, instalá-las ou testá-las incorretamente, danificando-as.

Dois pontos importantes estão destacados. A ventilação insuficiente no interior do container e o layout do próprio container que prejudica a circulação do ar. Essas duas causas são as principais, segundo a análise do grupo, por causarem o efeito de queda no rendimento da bateria, e serão o ponto focal da ação do projeto.

Figura 9 – Diagrama de Ishikawa



Fonte: Autores

## 2.4 CAUSA RAIZ: OS 5 PORQUÊS

Uma outra maneira muito eficiente de identificar um problema é utilizar a ferramenta dos cinco porquês. Funciona de maneira muito objetiva e orgânica e consiste em se questionar qual o motivo de algo ocorrer e buscar a melhor resposta para essa pergunta, e cada nova pergunta deve levar o grupo a se aprofundar mais na questão e termina com mais uma indagação. Ao responder cinco vezes, a causa-raiz geralmente é encontrada.

Parte-se da premissa que as baterias do carro estão operando com baixa eficiência. Daí a primeira pergunta é: Por que as baterias estão operando fora da região de maior eficiência? A resposta: Porque estão trabalhando em temperaturas acima de 35°C.

A segunda indagação: Por que as células estão operando acima dos 35°C? R: Porque o sistema de arrefecimento é insuficiente para promover o funcionamento adequado.

O que nos leva a mais um questionamento: Por que o sistema de arrefecimento é insuficiente? E a resposta: Pois algumas provas exigem rejeição térmica alta, e isso causa elevação da temperatura das células.

E isso leva a indagação: Por que o sistema de arrefecimento não é adequado às provas das competições? R: porque o modelo de chassi atual, não suporta a condição ideal de projeto.

E finalmente: Por que o modelo do carro é inadequado? A resposta: Porque não permite que haja ventilação necessária no pack de baterias.

Figura 10 – Os 5 Porquês

<p>1º - Por que as baterias estão operando fora da região de maior eficiência? R: Porque estão trabalhando em temperaturas acima dos 35°C</p>
<p>2º - Por que as células estão operando acima dos 35°C? R: Porque o sistema de arrefecimento é ineficiente para promover o funcionamento adequado</p>
<p>3º - Por que o sistema de arrefecimento é ineficiente para o funcionamento correto? R: Porque algumas provas exigem rejeição térmica que causa elevação da temperatura.</p>
<p>4º - Por que o sistema de arrefecimento não é adequado às provas das competições? R: Porque o modelo de chassi atual não suporta a condição ideal de projeto.</p>
<p>5º - Por que o modelo do carro é inadequado? R: Porque não há ventilação necessária no pack de baterias.</p>

Fonte: Autores

Após responder as cinco indagações, conclui-se que o motivo que provoca o superaquecimento das células é o design do veículo que não prevê a ventilação do container necessária para as células operarem na condição mais eficiente. Portanto, o estudo será direcionado a estudar como é possível melhorar a ventilação e proporcionar condições de trabalho melhores às células.

De maneira complementar ao diagrama de Ishikawa, onde se conclui que as causas principais são o layout do container e a falta de ventilação do pack, a ferramenta dos cinco porquês indica o mesmo ponto a ser observado, a necessidade de promover ventilação adequada às células do container.

## 2.5 GUIDELINE DO PROJETO: GOLDEN CIRCLE

O Golden Circle, uma metodologia criada pelo especialista em liderança Simon Sinek, tem como objetivo criar e desenvolver o valor de uma nova ideia, negócio ou campanha, visando provocar impacto positivo. Foi desenvolvido para sistematizar um novo modo de pensar, agir e comunicar de maneira mais objetiva e despertar relevância.

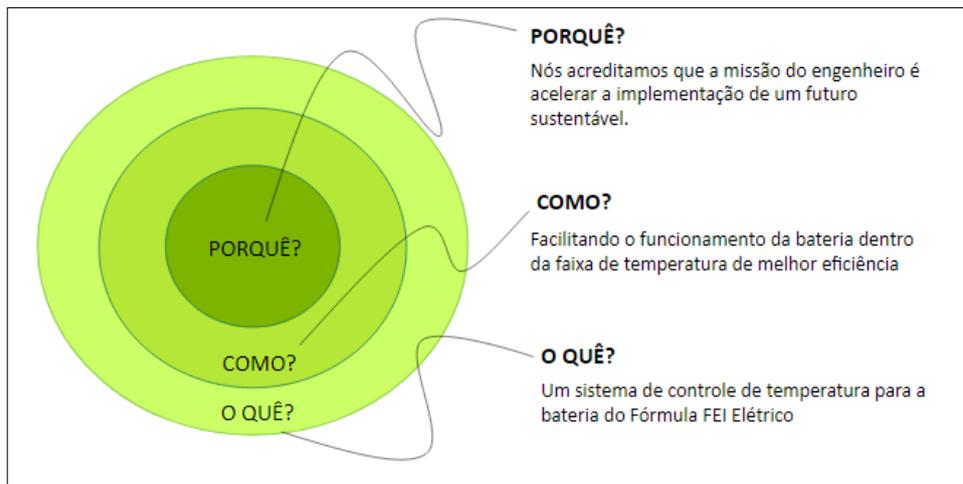
Segundo Simon, grandes líderes possuem algo em comum: todos pensam, agem e se comunicam de dentro para fora do círculo. Na camada central, está a pergunta “por quê?”, na camada intermediária, “como?”, na camada externa, “o quê?”.

Ao centro, a motivação, o que move o grupo a realizar o que se propôs. O grande porquê do projeto serve como orientação durante todo o desenvolvimento e causa engajamento por evocar um sentimento de que o objeto pode ter impacto na vida e no futuro das pessoas podendo melhorar a qualidade de suas vidas, e por isso se torna relevante. O centro deste trabalho é ajudar na pavimentação do caminho para um futuro mais sustentável e eficiente.

A maneira, quase tão importante quanto o motivo, explica o caminho que o projeto vai tomar para alcançar sua finalidade. O meio no qual o produto opera e justifica, tanto o produto em si, quanto o motivo inicial e conduz o público desde a concepção da ideia até o produto finalizado. Ao criar condições favoráveis para um funcionamento mais eficiente das baterias, o grupo acredita que contribui para a sustentabilidade.

Por fim, o objeto, o produto. O ponto de encontro entre o motivo e o caminho. A materialização do “porquê” alinhado ao “como”. O “o quê” será o encarregado de tornar reais, as aspirações do projeto. Um sistema de arrefecimento, aplicado ao FSAE FEI Elétrico é o primeiro resultado da jornada.

Figura 11 – Golden Circle projeto B.Cooler



Fonte: Autores

## 2.6 ANÁLISE DE VIABILIDADE

Para analisar se o projeto é comercialmente viável, é preciso analisar se o problema é real e requer solução, se há demanda no mercado para essa solução, e disponibilizar uma métrica simples para que possíveis clientes possam verificar se compensa investir no produto.

O grupo pretende capitalizar, não um produto físico, mas uma metodologia que podemos aplicar a qualquer caso diferente, em que partimos das condições iniciais de cada veículo e encontramos a melhor solução para o cliente, como uma consultoria.

Células de carga operando em temperaturas que prejudicam seu desempenho e até comprometem sua integridade é uma situação comum e necessita de soluções que diminuam sua ocorrência. Outras equipes que competem na FSAE podem ter interesse em adquirir nossa solução, e cresce a demanda crescente do mercado por veículos elétricos leves nos ramos de e-commerce, logística, serviços postais e mobilidade; por exemplo, fabricantes como a Yamaha, EZ-GO, Voltz, GEM, Drop Boards, MellowVans entre outras.

Os clientes podem decidir se o custo do projeto faz sentido, ao comparar o custo de cada kW de calor retirado do pack do veículo, e quais os impactos disso em autonomia, desempenho, manutenção e descarte de baterias.

## 2.7 NORMAS TÉCNICAS, DE SEGURANÇA E LEGISLAÇÃO

A maior parte da legislação de trânsito brasileira tem como objetivo evitar situações que coloquem a vida das pessoas em risco enquanto estão no trânsito, ou seja, visam a segurança de todos. As normas e leis servem como guias de como devemos nos portar e quais as condições mínimas de segurança que os veículos devem apresentar para que não se tornem riscos aos ocupantes e a outras pessoas fora dos veículos. Os veículos elétricos fazem parte do grupo dos veículos denominados zero emissões, que, por terem um meio de locomoção não poluente, não emitem gases nocivos para o ambiente, nem emitem ruído considerável, pois são bastante silenciosos. Dessa maneira, o projeto precisa obedecer não somente as leis e normas impostas para veículos elétricos, mas também o regulamento da competição. Para normas e legislação temos os seguintes itens:

- **ISO 6469- Requisitos de segurança de veículos elétricos;**
- **ISO NBR15570 - Características construtivas para ônibus urbanos;**
- **Manual dos Padrões Técnicos de Veículos - Tração Elétrica (SPTrans)**
- **ABNT NBR IEC61851 - Sistema de recarga para VEs;**
- **ABNT NBR IEC 62196 - Plugs e tomadas fixas e móveis para VEs;**
- ABNT ISO 8713 - Veículos rodoviários propelidos a eletricidade;
- IEC 62752 - Proteção dos cabos.
- ISO 26262 - Segurança funcional no sistema de desenvolvimento de sistemas
- automotivos;
- Lei 13.775/18 e Decreto 9.557/18 - Requisitos obrigatórios para comercialização e para a importação de veículos novos no país;

Em relação ao regulamento da competição temos:

- Potência máxima oferecida pela bateria: 80kW **(EV.4.4.1)**
- Monitoramento de temperatura deve ocorrer quando: Sistema trativo ativado ou bateria carregando **(EV.8.2.1 a e b);**
- Temperatura da bateria não deve superar: 60°C ou a recomendada pelo fabricante (a que for menor) **(EV.8.5.2);**
- O sensor de temperatura deve estar conectado ao terminal negativo, e deve monitorar, ao menos, 20% das células **(EV.8.5.4 e EV.8.5.5 a);**
- Materiais de isolamento e cabos devem suportar 90°C **(EV.7.2.1 e EV.7.3.2);**

- O sistema de arrefecimento deve ser conectado ao sistema de gerenciamento (AMS) por segurança (**EV.8.3.4 e EV.8.3.5**);
- Sensores de temperatura devem ser eletricamente isolados: entre o sensor e a célula ou no circuito do sensor (**EV.8.5.7**).

## 2.8 REQUISITOS DE ENGENHARIA

Os requisitos que devemos atender são: Promover o controle térmico do pack de baterias, elevar o tempo em que a bateria funciona dentro do intervalo de temperatura ótimo, e maximizar a quantidade de calor trocada entre as baterias e o sistema projetado. Portanto, é necessário que a bateria seja monitorada constantemente, com aferições em °C, medir o tempo em que a bateria está na faixa ótima, em segundos, e avaliar os ganhos na troca de calor em °C/s, podendo transformar esta unidade em % de rendimento.

## 3 ANÁLISE DE MERCADO

Uma das maneiras de saber se uma ideia tem chance de se tornar um sucesso, é avaliar se há espaço para ela no mercado. Se a demanda por determinado produto, serviço ou inovação for grande, o projeto tem razão para evoluir, caso contrário, já se sabe que não há necessidade de tentar implementá-lo, ou que a concorrência é grande e, por consequência, a chance de êxito é menor.

O trabalho tem como objetivo, criar uma metodologia de abordagem para problemas de rejeição de calor. Qualquer máquina que necessite aumentar sua eficiência e uma forma de se conseguir isso é por meio do aumento das trocas térmicas, o projeto B.Cooler pode ajudar. Especialmente quando se trata de veículos elétricos leves, tais como o FSAE FEI.

### 3.1 DEMANDA POR VEÍCULOS ELÉTRICOS NO MUNDO

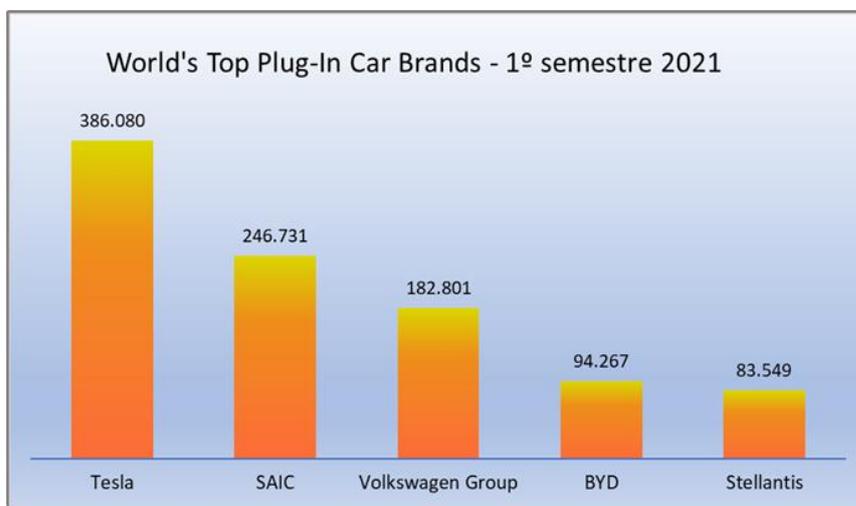
A demanda do mercado por veículos elétricos vem crescendo rapidamente. No primeiro semestre de 2021, a Tesla, principal fabricante de EVs no mundo, vendeu pouco mais de 386 mil unidades, sendo que o Model 3, o modelo mais vendido, é responsável por 63% do volume.

Grandes nomes do e-commerce, logística e serviços de entrega no mundo, como DHL, UPS, Amazon, FedEx, Deutsche Post e algumas empresas nacionais, já começaram a utilizar EVs de diversos tamanhos para fazer os serviços de entrega.

Um estudo da *International Energy Agency* (IEA) publicado em 2021, prevê vendas na ordem de 145 milhões de EVs até 2030 ao redor do mundo. Atualmente na Noruega, carros elétricos representam cerca de 77,5% da frota nacional, e a venda de veículos a combustão está

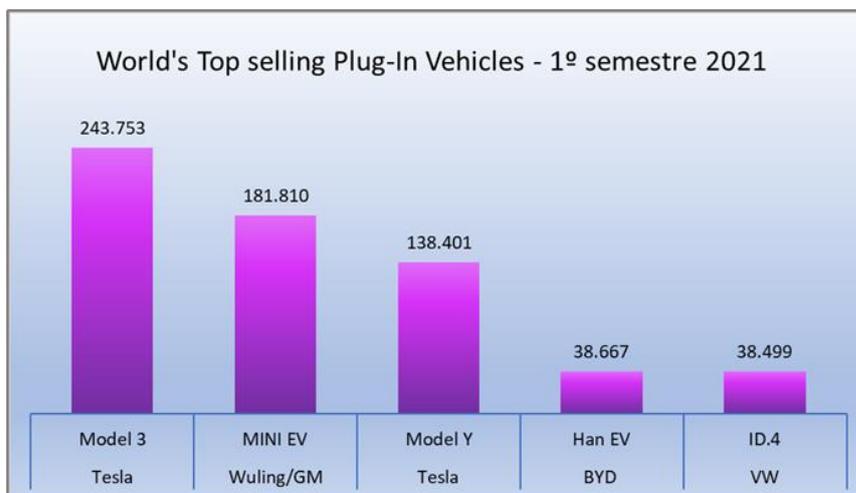
prevista para encerrar em 2025. Algumas das principais fabricantes de automóveis do mundo planejam investir dezenas de bilhões de dólares nos próximos anos para aumentar a presença de veículos eletrificados ou elétricos em seus portfólios, e investimentos em tecnologias de softwares para seus veículos e aprimoramentos da infraestrutura para suportá-los. A Ford pretende investir US\$30 bi para eletrificar metade de seu portfólio até 2030; O Grupo Stellantis deseja transformar, até 2025, 98% de todos os veículos de suas marcas em elétricos ou PH e o Grupo VW planeja um aporte de US\$ 41 bi para eletrificação de veículos e desenvolvimento de softwares automotivos.

Figura 12 – Maiores fabricantes de EVs plug-in no 1º semestre de 2021



Fonte: Autor “adaptado de” <https://cleantechnica.com/2021/08/01/plugin-vehicles-have-record-month-globally-in-june-tesla-model-3-model-y-take-1-2/>

Figura 13 – PI EVs mais vendidos no mundo no 1º semestre de 2021



Fonte: Autor “adaptado de” <https://cleantechnica.com/2021/08/01/plugin-vehicles-have-record-month-globally-in-june-tesla-model-3-model-y-take-1-2/>

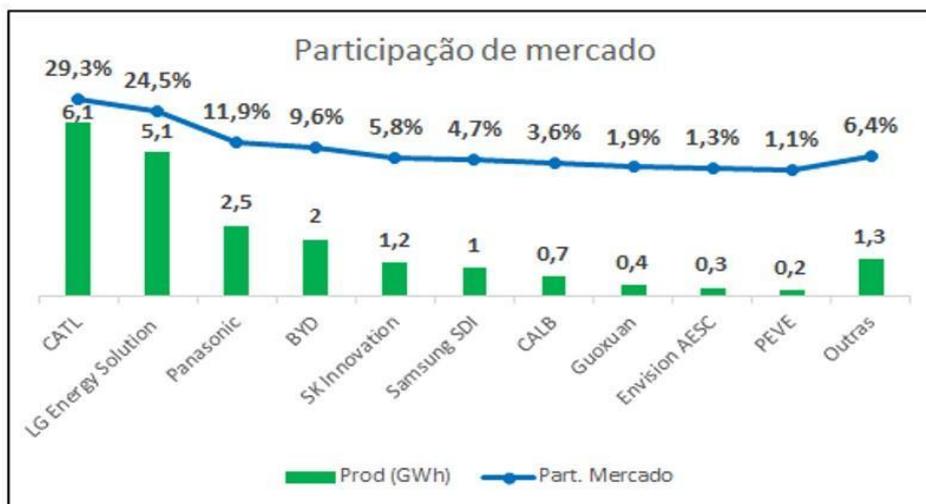
### 3.2 FABRICANTES DE BATERIAS

O mercado de baterias está cada vez mais aquecido com as constantes evoluções tecnológicas e devido ao apelo por soluções cada vez mais limpas quando se fala de mobilidade urbana. Com o aumento da procura de soluções híbridas e elétricas, espera-se que até 2035, 60% dos veículos vendidos no país sejam elétricos. Crescem as pressões políticas para soluções que agridam menos o meio ambiente, como por exemplo, transportes públicos urbanos com emissão zero e incentivos fiscais para veículos híbridos e elétricos.

Também é possível relacionar o aumento da demanda de baterias com o avanço das tecnologias empregadas visando aumento da autonomia, diminuição no tempo de carregamento e consequentemente com o aumento da produção o custo tende a diminuir.

Em relação as fabricantes de baterias, há três grandes nomes no setor que juntas obtém 66% de participação de mercado, sendo elas CATL, LG Energy Solution e Panasonic. Destaque para a LG Chem, que atualmente é uma das maiores produtoras de baterias para veículos híbridos/ elétricos, tendo superado os dois maiores líderes de produção em 2019, que eram a CATL e a Panasonic. Ambas foram impulsionadas pelas vendas da Tesla, um dos grandes clientes, já no caso da LG Chem forneceu apenas 14% de sua produção à montadora. Sendo assim a Panasonic vendeu cerca de 80% das suas baterias produzidas que foram utilizadas pela Tesla. Dentro do mercado de veículos, em 2020, Tesla permanecia como líder no mercado de veículos elétricos com uma produção de mais de 100 mil veículos, ficando muito acima de seus concorrentes como o Grupo Volkswagen e a aliança Renault-Nissan-Mitsubishi.

Figura 14 – Maiores fabricantes de baterias



Fonte: Autor “adaptado de” <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/sector/produccion-baterias-vehiculos-electricos-aumenta-2021-principales-fabricantes/20210915150221049195.html>

## **4 FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE ENGENHARIA**

Com a intenção de justificar as decisões tomadas durante o desenvolvimento do projeto, por meio de uma base sólida e objetiva, serão apresentadas e expandidas diversas ferramentas de gestão de projetos, aplicadas nas diversas frentes englobadas pelo trabalho, que além de construir, ajudam a conduzir o grupo. Iniciando por uma visão macro do projeto e aprofundando a análise a cada nova ferramenta, o intuito é entender o comportamento das partes e do todo, avaliar riscos e modos de falha, entender quais as necessidades do projeto e qual a forma mais adequada de atendê-las; revisar as escolhas feitas, adaptar o projeto quando for necessário e ao final, estipular uma meta de desempenho para se tornar referência.

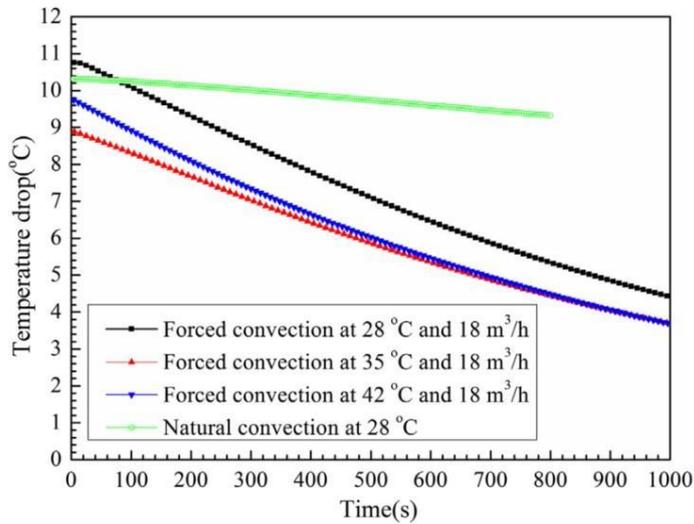
### **4.1 PROPOSTAS PARA O FLUIDO DE ARREFECIMENTO**

Como visto anteriormente no estudo da causa-raiz do problema, o fluido de arrefecimento está entre os principais fatores provocadores do aquecimento excessivo das células e por esse motivo, é necessário que se leve em conta a possibilidade de substituir o ar por um fluido mais adequado, assim, foram avaliadas algumas propostas.

A referência desta análise será o sistema atualmente empregado pela equipe, nos modelos RB7 e RB8. Dois containers de kevlar com entradas passivas pequenas que ficam fixados nas laterais do cockpit e envolvidos pelos sidepods, que são fechados; situação que desfavorece a troca térmica.

A primeira comparação é justamente uma das inovações para o próximo modelo, o RB9; apenas um container de alumínio, localizado na parte traseira do carro, onde estarão todas as células que contarão com um conjunto de ventoinhas na admissão e na saída do container, promovendo convecção forçada constante. A opção por ventilação do pack tem certas vantagens como, a baixa massa adicionada ao veículo, necessidade de poucos componentes para o sistema, baixo custo e a possibilidade de as ventoinhas manterem fluxo de ar constante mesmo com o veículo parado. Infelizmente, o ar não tem propriedades térmicas que favorecem a troca de calor, possui condutividade térmica baixa e, portanto, o sistema teria eficiência baixa. Além disso, o sistema fica dependente das condições do ar no dia da competição; temperatura e umidade podem limitar ainda mais o efeito que se espera.

Figura 15 – Queda de temperatura de acordo com o tipo de convecção no ar

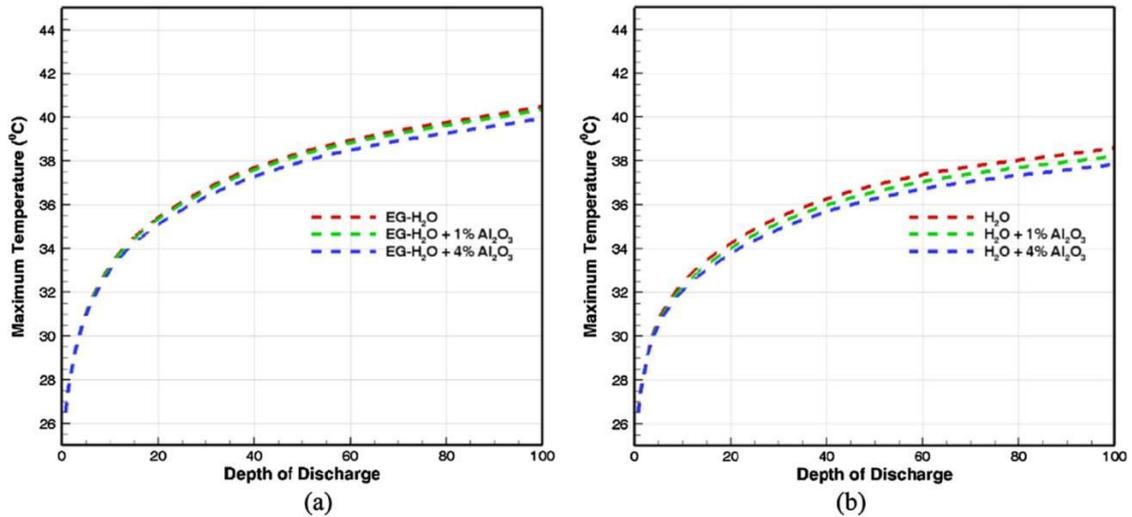


Fonte: XIE *et al.*, 2018

O gráfico mostra a diferença entre a convecção natural agindo sobre uma célula que se aquece e a convecção forçada, em diferentes velocidades do ar e temperaturas. O impacto é notavelmente superior a favor da convecção forçada, mesmo para temperaturas do ar superiores à da convecção natural.

A aplicação de nano fluidos é bastante comum quando se pretende arrefecer sistemas elétricos. Nano fluidos podem ser confeccionados para possuírem características específicas segundo as demandas da aplicação, portanto têm propriedades térmicas projetadas que podem variar muito; são dielétricos e podem promover trocas térmicas superiores às de fluidos convencionais. Infelizmente o líquido adiciona massa ao carro, necessita de um sistema de bombeamento, sofre de alta perda de carga e alto custo.

Figura 16 – Curvas de aquecimento de diferentes fluidos de arrefecimento

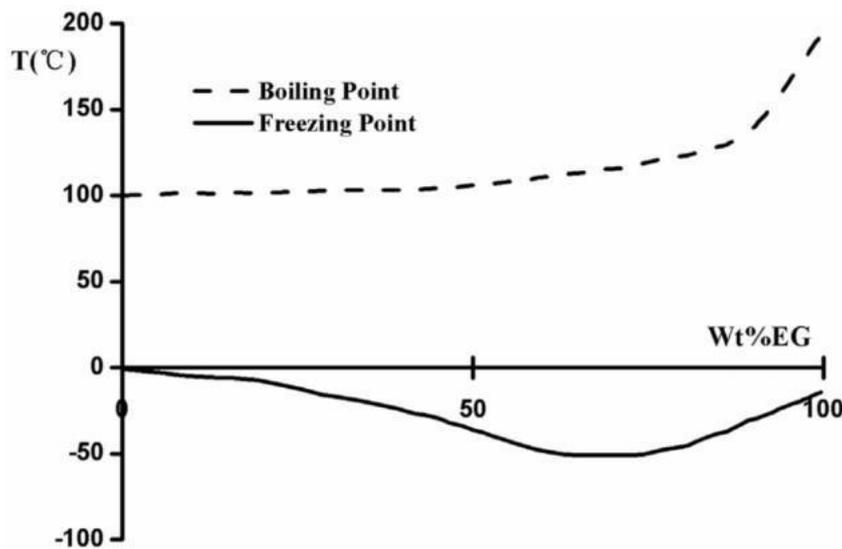


Fonte: YOUANWANG *et al.*, 2018

Os perfis de temperatura do módulo de bateria com diferentes meios de resfriamento são mostrados na figura 12. Os resultados mostraram que os nano fluidos à base de água pura se saem melhor no controle da temperatura máxima e do desvio de temperatura da bateria, isso porque a condutividade térmica da água pura é maior que a do glicol. Quanto mais baixas as curvas, melhor o fluido.

Outro recurso muito comum na indústria da mobilidade elétrica, é utilizar a solução de água e etilenoglicol para resfriar as células. Uma mistura 50/50 tem condutividade térmica superior à do ar e da água; a mistura, em relação a água somente, tem o ponto de ebulição mais alto e ponto de fusão mais baixo, ou seja, permanece líquido em uma faixa de temperatura maior que a de suas partes e por isso mantêm as características termodinâmicas por mais tempo. Por ser muito empregada na indústria, é considerada uma tecnologia madura e, portanto, tem custo baixo. Assim como visto anteriormente, adiciona massa ao carro e precisa de sistemas de bombeamento e condutos, e deve-se levar em conta que o etilenoglicol é tóxico.

Figura 17 – Características da água em função da concentração de etilenoglicol



Fonte: WEIXIONG *et al.*, 2018

O ponto de congelamento da mistura varia com a porcentagem de etilenoglicol. Como pode ser visto na Fig. 13, quando a porcentagem de etilenoglicol na água é de 60%, a mistura não congela até  $-45^{\circ}\text{C}$ . Para uso em campo automotivo em ambiente normal, a proporção de escolha mais comum de etilenoglicol e água é 50:50 [207]. O sistema BTM da Tesla e da GM usa glicol/água líquida como HTF para finalizar a transferência de calor com um ciclo de refrigeração e aquecer as células pelo modo de aquecimento por resistência elétrica.

Uma alternativa que vem ganhando espaço em diversos mercados quando se trata de controle térmico, é aplicar um material de mudança de fase, ou PCM (*phase changing material*). Geralmente encontrados na forma de gel ou cera, o material pode ser projetado para ter sua temperatura de fusão próxima à desejada pelo projeto, assim, o PCM se utiliza do calor latente de fusão para derreter e absorver mais calor que outras maneiras mais usuais. Conseguem manter a temperatura uniforme enquanto na fase latente, não requerem sistemas auxiliares e são mais adequados para lidar com temperaturas elevadas. Como funcionam melhor ao iniciarem o processo de mudança de fase e sua temperatura de fusão, apesar de customizável, ser fixa, quando em baixas temperaturas, tem eficiência inferior que a do ar e algumas formulações têm

propriedades térmicas semelhantes ao ar e por isso, o impacto pode ser equiparável, até temperaturas próximas aos 60°C.

Um método para controle térmico de sistemas elétricos menos comum é o *Novec 7000*, da 3M. Funciona de maneira semelhante a um PCM, vai do estado sólido para o líquido. É um excelente dielétrico, tem o ponto de fusão próximo aos 34°C, é indicado a aplicações onde ocorrerão altas taxas de descarga e tem boa condutividade térmica. É uma substância de alto valor agregado, densidade alta, e necessita de sistemas complementares.

Figura 18 – Impacto do PCM em relação à ventilação sob taxa de descarga de 3A

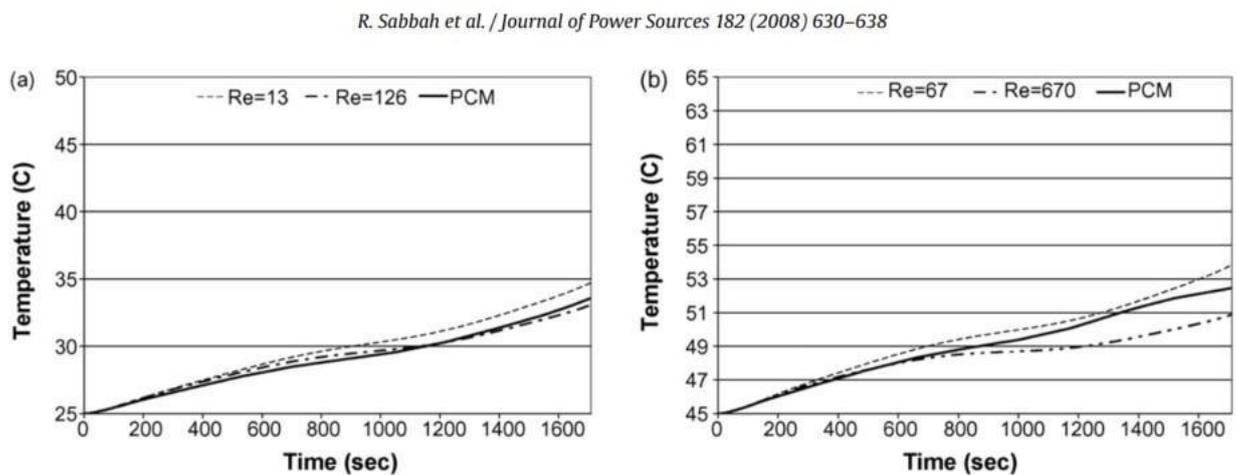


Fig. 4. Comparison of cooling systems based on volume averaged cell temperature at 3 A: (a)  $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$  and (b)  $T_{amb} = 45^{\circ}\text{C}$ .

Fonte: SABBAH *et al.*, 2008

É possível observar que a temperatura de uma célula é mantida abaixo de 35°C em todos os esquemas de resfriamento. A superioridade do resfriamento a ar em relação ao resfriamento PCM ou vice-versa não é o caso para esta condição. Os sistemas de gerenciamento ativo e passivo são suficientes devido à baixa geração de calor a 3 A. Por outro lado, quando a temperatura ambiente é de 45°C, o resfriamento a ar ainda é capaz de manter a temperatura da célula local na descarga de 2C abaixo de 55°C, que foi selecionada como a temperatura máxima permitida neste estudo, mas isso requer uma vazão maior ( $Re = 67$ ). Além disso, quando a temperatura de operação do pacote é aumentada de 25°C para 45°C, o resfriamento em  $Re$  alta mostra uma temperatura da célula mais baixa em comparação com o resfriamento passivo observado na Fig. 14 (b), no entanto, também mostra que a redução da velocidade do ar ou  $Re$  para uma ordem de magnitude resulta em uma temperatura final mais alta para resfriamento

ativo. No entanto, a temperatura da célula pode ser mantida abaixo de 55 °C em todos os casos e qualquer um dos sistemas de gerenciamento térmico é adequado.

Figura 19 – Impacto do PCM em relação à ventilação sob taxa de descarga de 10A

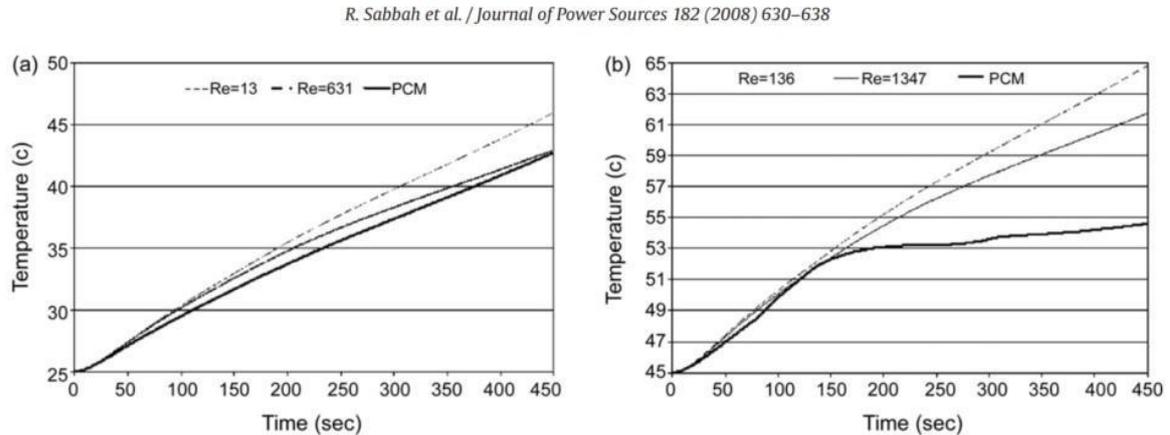


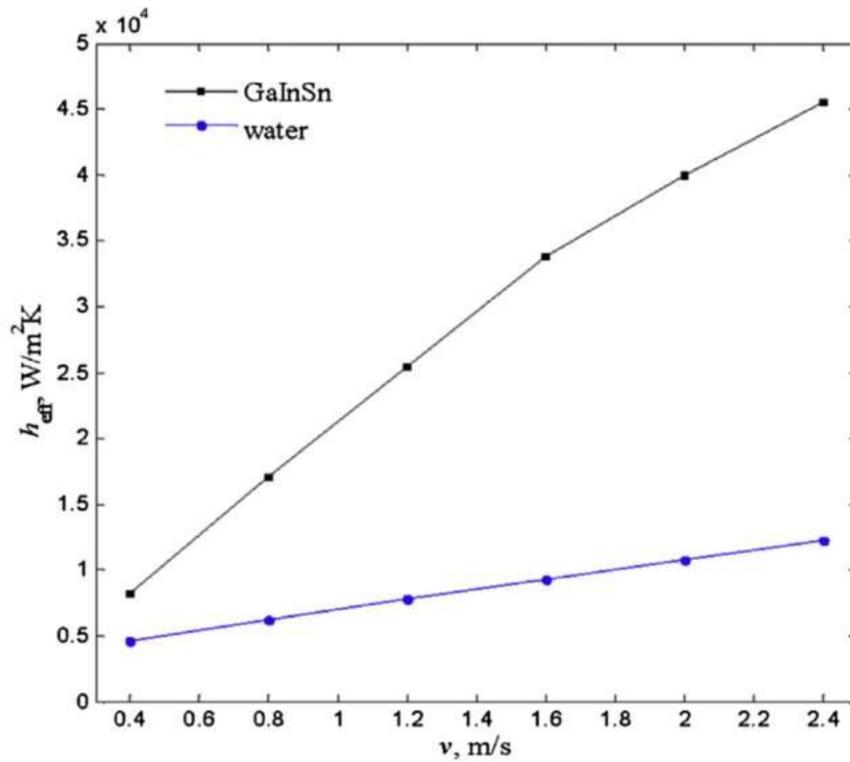
Fig. 5. Comparison of cooling systems based on volume averaged cell temperature at 10 A: (a)  $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$  and (b)  $T_{amb} = 45^{\circ}\text{C}$ .

Fonte: SABBAAH *et al.*, 2008

O aumento da corrente de 3 A para 10 A requer um resfriamento eficiente, pois a geração de calor aumenta significativamente. A figura 15, mostra a vantagem do uso do PCM, uma vez que começa a utilizar o calor latente da parafina. Para manter a temperatura da célula abaixo de 55°C, deve-se aumentar significativamente a velocidade do fluxo de ar ( $Re = 631$ ). Ao aumentar a velocidade do ar por cerca de 50 vezes, a temperatura da célula pode ser reduzida para apenas 45,7–49,0°C. Uma clara vantagem do uso de PCM pode ser vista na Fig. b para o caso de temperatura ambiente de 45°C e corrente de descarga de 10 A. A temperatura continua aumentando, mesmo antes da metade do tempo de descarga, durante o resfriamento ativo, não importa quão alto o fluxo laminar esteja excedendo 55°C.

Também foi analisada a aplicação do metal gálio. Uma aplicação incomum, mas que traz como benefícios, a viscosidade baixa, propriedades termodinâmicas favoráveis, possibilidade de bombeamento magnético e é um material dielétrico. Assim como outros fluidos, o gálio adiciona massa ao carro, necessita de sistemas de bombeamento e troca de calor (radiador), sofre de alta perda de carga em condutos e tem preço elevado.

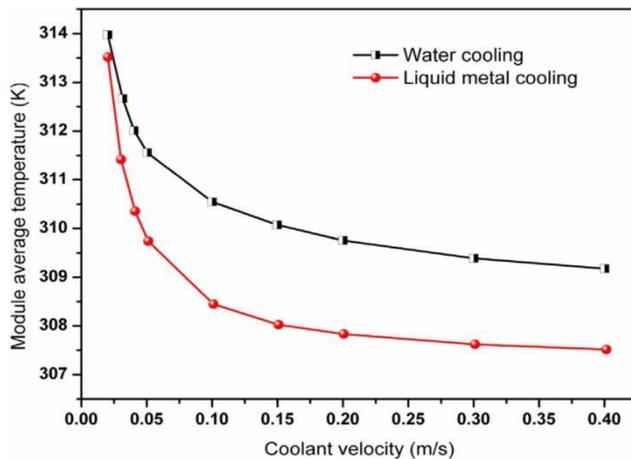
Figura 20 – Coeficiente de transferência de calor da água e do gálio



Fonte: DENG *et al.*, 2018

Na figura 20, pode-se observar que o coeficiente de transferência de calor equivalente é maior e aumenta mais rapidamente ao usar GaInSn do que ao usar água. Isso significa que o uso de metal líquido como refrigerante tem a vantagem de obter maior desempenho térmico, mas ao preço de uma alta queda de pressão. Pode-se concluir que o metal líquido é um bom candidato a refrigerante para sistema de refrigeração líquida.

Figura 21 – Comparação entre água e metal líquido como fluidos de troca térmica



Fonte: WEIXIONG *et al.*, 2018

Devido à condutividade térmica do metal líquido ser várias dezenas de vezes maior que a da água, o sistema baseado em metal líquido apresentou um desempenho térmico muito melhor e menor consumo de energia sob a mesma condição de fluxo.

Por fim, estudou-se a possibilidade de utilizar um dos fluidos mais comuns para esta aplicação, o óleo mineral. Valendo-se da maturidade da tecnologia e da possibilidade de ser um dos sistemas mais compactos dentre os analisados, caso opte-se pelo contato direto célula-fluido, conta com calor específico superior ao do ar, promove uniformidade de temperatura e facilidade de obtenção alinhada ao preço atrativo. Mais uma vez, adiciona massa ao carro, precisa de sistemas complementares, tem alta viscosidade, e caso seja aplicado no contato direto, sua eficiência cai em relação ao contato indireto.

Tabela 1 – Diferentes métodos de arrefecimento para o mesmo ganho de temperatura

Parâmetros	Unidades	Ar	Óleo Mineral	Água/Glicol
Ganho de temperatura	°C	8,4	8,2	8,3
Velocidade do fluxo	m/s	4	0,00275	0,015
Queda de pressão	Pa	148	279	189
Taxa de fluxo de massa	g/s	0,96	0,49	0,29
Consumo de potência	mW	116	0,15	0,051

Fonte: Autor “adaptado de” CHEN, et al., 2015

A tabela ajuda a ilustrar que a ventilação causa a maior perda parasitária de energia, mas propicia o fluxo mais alto para um ganho de temperatura semelhante aos outros métodos.

Tabela 2 – Matriz de Decisão dos Fluidos de Arrefecimento

<b>Crítérios</b>	<b>Peso do critério</b>	<b>Referência: RB7</b>	<b>Ventilação</b>	<b>Nano Fluido</b>	<b>Água + Etilenoglicol</b>	<b>PCM</b>	<b>Novec™ 7000</b>	<b>Gálio</b>	<b>Óleo Mineral</b>
Massa do Sistema	<b>3</b>	<b>0</b>	-1	-2	-2	-1	-2	-2	-2
\$/kw de Calor Retirado	<b>1</b>	<b>0</b>	1	1	1	-1	-1	-1	0
Eficiência na Troca de Calor	<b>3</b>	<b>0</b>	2	2	2	1	1	2	1
Quantidade de Componentes	<b>1</b>	<b>0</b>	-1	-2	-2	-1	-2	-2	-2
Consumo de Energia	<b>2</b>	<b>0</b>	-1	-2	-2	0	-2	-2	-2
Manutenção Simples	<b>1</b>	<b>0</b>	1	-2	-2	-1	-2	-2	-1
Tempo para início da troca de calor	<b>3</b>	<b>0</b>	2	2	2	0	1	2	1
<b>RESULTADO:</b>	<b>-</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-3</b>	<b>-9</b>	<b>-3</b>	<b>-7</b>

Muito Pior

Pior

Igual

Melhor

Muito Melhor

Fonte: Autores

Uma vez que estão levantadas todas as possibilidades de fluido de arrefecimento, a melhor maneira de comparar é por meio de uma matriz de decisão. Na primeira coluna da esquerda se localizam os critérios que os fluidos serão analisados, trazidos pela equipe FSAE FEI e classificados quanto a sua relevância para o projeto; daí vêm os pesos de cada critério. Cada fluido será comparado à referência (RB7 com aberturas passivas nos containers) e receberá a pontuação com base nessa comparação direta. Será atribuída pontuação de valor zero, caso o fluido avaliado, naquele critério, tenha impacto semelhante ao encontrado na referência. Valores +1 e +2 são atribuídos caso o fluido tenha desempenho “melhor” ou “muito melhor”, respectivamente; e os valores -1 e -2 são atribuídos caso o fluido avaliado seja, na comparação, “pior” ou “muito pior”, respectivamente, que a referência no critério analisado.

Após a comparação, a proposta que obteve o melhor resultado foi a ventilação. Apesar de não possuir propriedades que favoreçam a troca de calor, a ventilação leva vantagem em alguns dos principais critérios, como massa do sistema e tempo para início da troca de calor. Pelas comparações, fica claro que, o sistema de ventilação é o mais indicado, mesmo que o ar não seja o melhor fluido para promover as trocas de calor, o sistema se mantém consistente em todos os quesitos, não causando prejuízos graves nem promovendo ganhos extensos. Uma solução equilibrada.

Tabela 3 – Comparação das propriedades físicas térmicas de diferentes fluídos

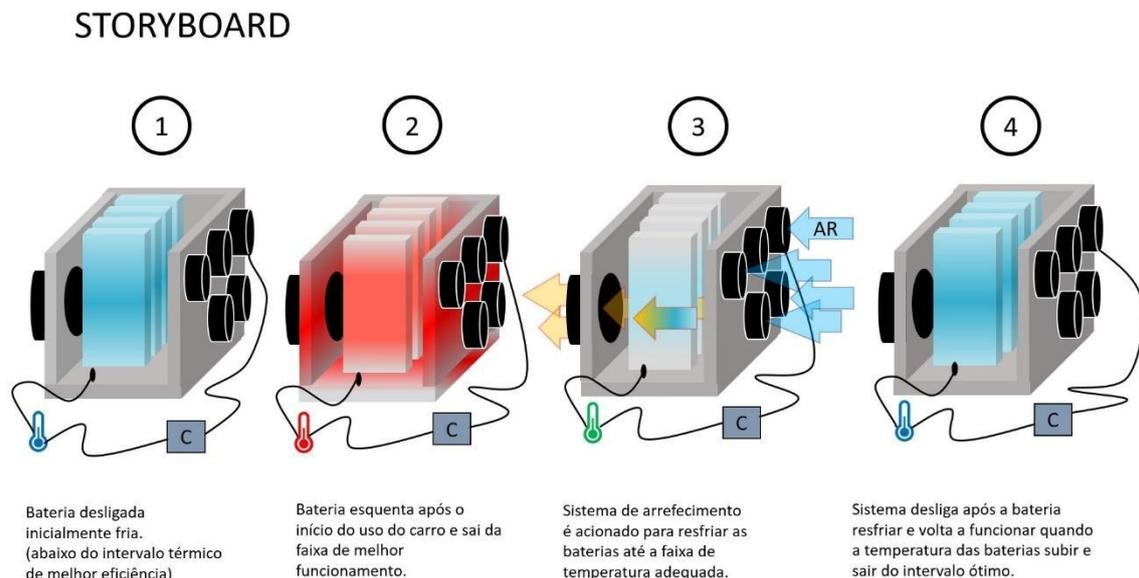
Parâmetros	Unidades	Ar	Óleo Mineral	Água/Glicol	Novec 7000
Densidade	kg/m <sup>3</sup>	1.225	924.1	1069	1400
Capacidade específica de calor	J/kg.K	1006	1900	3323	1300
Condutividade térmica	W/m.K	0.0242	0.13	0.3892	0.075
Viscosidade cinemática	m <sup>2</sup> /s	1,46 x 10 <sup>-5</sup>	5,60 x 10 <sup>-5</sup>	2,58 x 10 <sup>-6</sup>	3.2 x 10 <sup>-7</sup>

Fonte: Autor “adaptado de” WEIXIONG *et al.*, 2018

## 4.2 STORYBOARD

No contexto de desenvolvimento de projetos, o storyboard tem como objetivo, mostrar, de maneira prática e visual, cada etapa de funcionamento do produto de forma simples. A sequência de funcionamento deste projeto possui quatro etapas que estão esquematizadas na figura abaixo.

Figura 22 – Etapas de funcionamento do sistema



Fonte: Autores.

Inicialmente, as baterias estão frias, pois o veículo se encontra desligado; nesse estágio, o sistema de arrefecimento não funciona, a fim de provocar um ganho de temperatura das

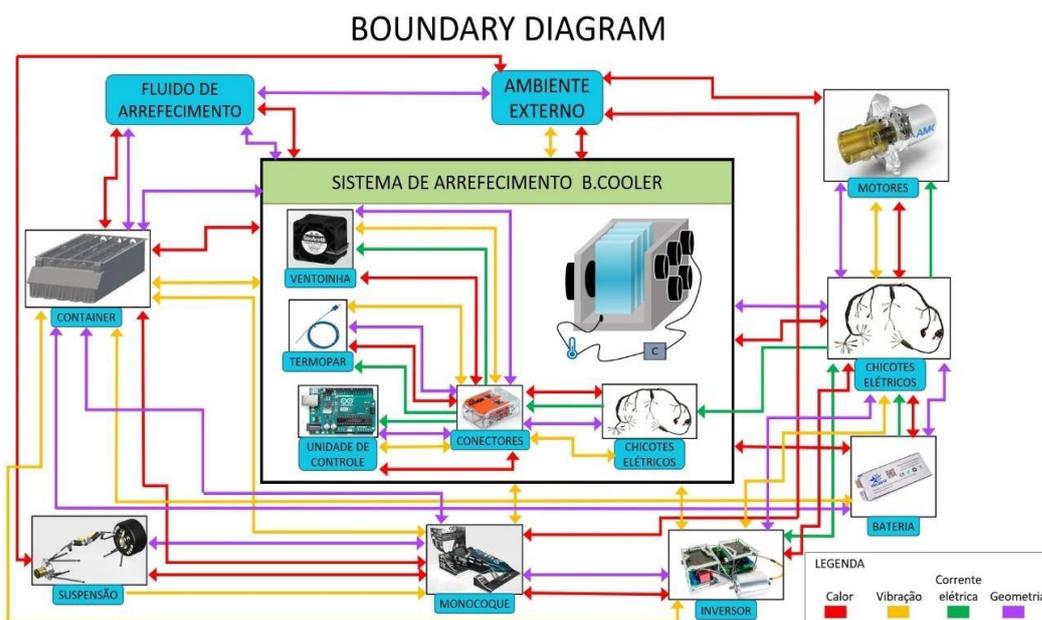
células para que estas atinjam a faixa de temperatura desejável. Após ligar o veículo e utilizá-lo por um tempo, as baterias se aquecem e atingem temperaturas mais altas que as desejadas.

O sistema, por meio da implementação de um sensor de temperatura e de uma unidade de controle, monitora a temperatura do pack e assim que identifica o sobreaquecimento, aciona as ventoinhas que iniciam o arrefecimento. O ar entra no container e resfria as células, as paredes do container e os barramentos, que são as estruturas onde as células estão fixadas e por onde passa a corrente. Quando o sistema identifica que a temperatura está dentro da faixa desejada, o sistema desliga as ventoinhas e passa a somente monitorar a temperatura do pack até que haja a necessidade de acionar as ventoinhas novamente.

### 4.3 BOUNDARY DIAGRAM

O *Boundary Diagram* é uma ferramenta de análise de interações. Permite observar como os componentes se comunicam, facilita a visualização das necessidades do projeto e auxilia na previsão de pontos críticos e modos de falha, se tornando assim, peça-chave na elaboração do FMEA, é uma ferramenta fundamental para se obter um resultado coeso e que se sustente. Neste sistema, é possível notar que há trocas de calor, vibrações, condução de corrente elétrica e componentes precisam de adaptações geométricas físicas para que possam se conectar e se fixar.

Figura 23 – Boundary Diagram



Fonte: Autores

Nesse diagrama fica evidente que todos os componentes trocam calor com, pelo menos, dois outros; daí a importância de se projetar um sistema de gerenciamento térmico. As vibrações, apesar de representarem uma parcela visual pequena, são transmitidas diretamente para o container, o que pode provocar falhas e comportamentos indesejados. Vale notar que mesmo os componentes do próprio sistema a ser projetado têm interações entre si que devem ser levadas em conta, para que não seja necessário redimensionar o sistema para dissipar mais calor ou revisar formas de fixação e conexão.

#### 4.4 ENGENHARIA REVERSA

Essa ferramenta mostra, com clareza, quais os componentes principais necessários para montar o sistema projetado e exibe informações relevantes sobre cada uma, como características físicas, fornecedores e processo de fabricação. Este recurso é comumente utilizado com diversas finalidades, por exemplo: cópia, aplicada para reprodução de produtos; melhorar deficiências de documentação, realizada quando a documentação de um sistema para sua concepção e produção não estão disponíveis; produtos de análise de segurança: para estimar os custos e identificar o potencial de violação de patente; fins acadêmicos: para fins de aprendizagem pode-se compreender as questões-chaves de um projeto; inteligência técnica do competidor: entender o que um concorrente está realmente fazendo; melhorar um sistema já existente: visando otimizar sua fabricação, segurança, durabilidade ou funcionalidade. A aplicação do processo no sistema em estudo pode ser visualizada na Tabela 3.

Tabela 4 – Componentes do Sistema

COMPONENTES					
	Ventoinha	Chicote Elétrico	Termistor	Conectores	Unidade de Controle
Massa [g]	53	30	1	1,7	25
Dimensões básicas [mm]	40 x 28	4 x 500	15 x 4	8,4 x 13,2 x 18,8	50 x 50
Material	Polímero	Cobre	Cobre/Níquel	Polímero/Cobre	Polímero/Metais
Fornecedor	Sanyo Denki	Fraellio	TKS	Wago	Arduino

Fonte: Autores

#### 4.5 ANÁLISE DE VALOR

Após analisar as interações dos componentes, é a vez de determinar suas funções. A análise de valor possibilita avaliar estas funções, o quão relevantes são e se os componentes listados precisam ou não ser substituídos por outros mais aplicáveis, por cumprirem bem ou mal tais funções. É uma ferramenta que auxilia o grupo a não desviar do objetivo, pois evidencia e qualifica essas funções, e alinhá-las ao direcionamento do projeto fica mais simples.

Tabela 5 – Análise de Valor

COMPONENTES	FUNÇÃO	FUNÇÃO	CLASSIFICAÇÃO				
			P/S	R/I/ND	U/E		
Ventoinha	Fornecer fluxo de ar	Fornecer fluxo de ar	S	R	U	P	Função Primária
	Dissipar calor	Dissipar calor	P	R	U	S	Função Secundária
	Emitir ruído	Emitir ruído	S	I	U	R	Relevante
	Receber comandos	Receber comandos	S	R	U	I	Irrelevante
Chicote Elétrico	Conduzir corrente	Conduzir corrente	S	I	U	ND	Não Desejável
	Transmitir dados	Transmitir dados	S	R	U	U	Função de Uso
	Conectar componentes	Conectar componentes	S	R	U	E	Função Estética
	Dissipar calor	Dissipar calor	S	R	U		
Termopar	Aquisitar dados	Aquisitar dados	S	R	U		
	Enviar dados	Enviar dados	S	R	U		
	Dissipar calor	Conectar chicotes	S	R	U		
Fluido de arrefecimento	Dissipar calor	Fixar chicotes	S	I	U		
Conectores	Conectar chicotes	Receber dados	S	R	U		
	Fixar chicotes	Analisar dados	S	R	U		
	Dissipar calor	Enviar comandos	S	R	U		
Unidade de controle	Receber dados						
	Analisar dados						
	Enviar comandos						

Fonte: Autores

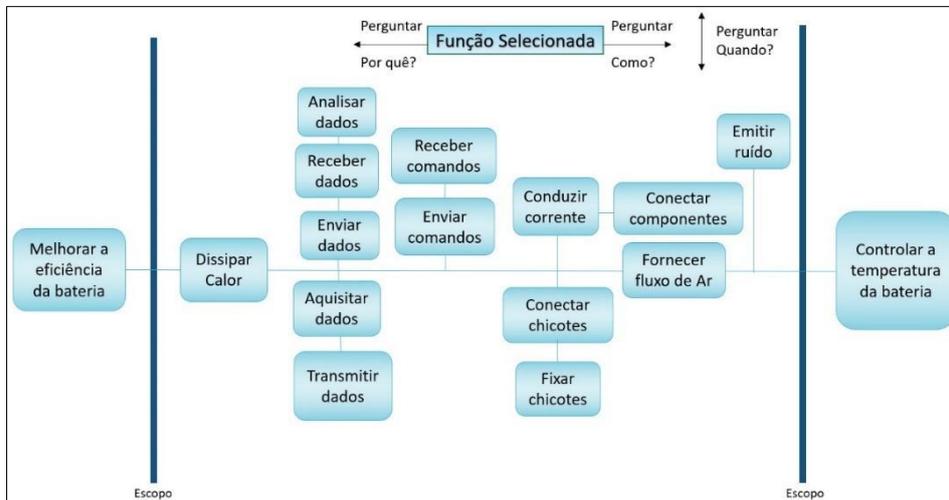
Nota-se que a função principal do sistema é dissipar calor, o que deve ser realizado com eficiência. Uma parte dessa troca é justamente o objetivo do sistema, podendo ser classificada como arrefecimento, mas outra parte é fruto da rejeição térmica de cada componente, e acaba incrementando a quantidade de calor total do sistema; uma condição intrínseca do sistema, não podendo ser contornada nem ignorada. Não foram identificadas funções indesejadas e apenas uma pequena parcela do todo é considerada irrelevante. O sistema não necessita de funções estéticas, por ser principalmente interno, e o estudo não indica a necessidade de substituição de nenhum componente.

#### 4.6 ANÁLISE FUNCIONAL: FAST

Complementando a ferramenta anterior, pode-se montar a Árvore de Análise Funcional do Sistema (FAST) para visualizar quais funções o sistema deve ser capaz de exercer, qual a função principal e quais as secundárias. Uma maneira gráfica de visualizar a análise de valor.

O objetivo do sistema projetado é controlar a temperatura da bateria, a fim de melhorar sua eficiência.

Figura 21 – FAST



Fonte: Autores

A leitura do diagrama pode ser feita se movimentando em quatro direções. Iniciando na extrema esquerda, e movimentando somente na horizontal, partindo do objetivo que é melhorar a eficiência da bateria, indo para a direita, deve-se questionar como realizar o objetivo ou ação. Chega-se na função de dissipar calor, e ao perguntar-se “como” novamente, e chega-se na função de fornecer fluxo de ar, e repetindo a pergunta mais uma vez, chega-se ao modo como pretende-se operar, que é controlar a temperatura da bateria. Pode-se fazer o caminho oposto se perguntando “por quê” e assim, partindo da maneira como se pretende resolver o problema, chega-se à motivação. A movimentação vertical pode ser feita ao se questionar “quando” para navegar pelas funções secundárias determinadas na análise de valor.

As funções determinadas na ferramenta anterior influenciam a forma como a árvore do FAST é construída. Organizando quais funções ficam na linha principal e quais se deslocam na vertical por serem funções secundárias. O projeto tem poucas funções como um todo, e apenas duas principais, sendo elas a dissipação de calor e o fornecimento de fluxo de ar, que levam o objetivo de elevar a eficiência da bateria ao modo, controle térmico das células.

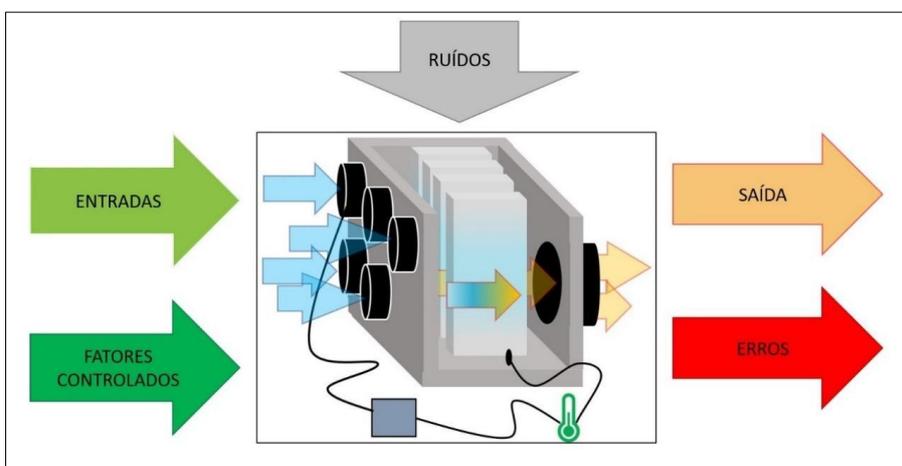
#### 4.7 P-DIAGRAM

O diagrama de parâmetros auxilia os engenheiros a compreender as relações físicas das funções de um projeto. Representa as entradas e saídas de um sistema, os fatores de controles que asseguram sua funcionalidade; também identifica os fatores que afetam seu desempenho na presença de variáveis internas e externas e conseqüentemente gerando saídas indesejadas (erros). Para cada uma das entradas, serão identificados parâmetros para atingir a saída necessária e esperada do produto. Além disso, o diagrama P é uma ferramenta extremamente recomendada na construção do FMEA de um sistema.

Na entrada do diagrama foi colocada a leitura da temperatura pelo sensor e os fatores controláveis que podem ser modificados a fim de obter a melhor resposta do sistema. E como saída, o controle da temperatura pelo sistema e possíveis erros que podem ocorrer durante o funcionamento, sujeitos a todos os fatores listados na parte superior, os ruídos, que não necessariamente são controláveis, mas influenciam no seu funcionamento e eficiência.

Para o sistema B.cooler, foram reunidas informações que contribuíram para o desenvolvimento do projeto. Desgaste devido ao uso, fatores externos, variação da peça, interação de sistemas e uso do cliente, são fatores altamente relevantes pois contribuem para o desenvolvimento do projeto facilitando a melhor visualização de como o produto será utilizado, como a sua utilização impactará o funcionamento e quais sinais serão relevantes para a determinação da resposta, além de possíveis erros que podem ocorrer a partir do sistema em geral.

Figura 24 – Diagrama - P



Fonte: Autores

O funcionamento do sistema está sujeito a fatores internos e externos que influenciam na sua resposta, chamados de ruídos. Os internos podem ser definidos por defeito de fabricação, variações de dimensões e interação entre componentes. Ruídos externos são os fatores fora do sistema, ou seja, condições atmosféricas durante o uso e ciclo de uso crítico. Os ruídos estão diretamente relacionados às causas vistas durante a problematização no diagrama de Ishikawa e nos cinco porquês.

Por sua vez as entradas, que tem como função descrever as fontes de energia necessárias para cumprir com a funcionalidade do sistema, no B.cooler foi utilizada a leitura de temperatura. Os fatores controlados que podem ser modificados como o packaging, materiais do pack, vazão, de ar, foi definido também a saída que é a resposta pretendida do sistema, atingir uma temperatura ideal de trabalho, ao longo do desenvolvimento do projeto são encontrados também os possíveis erros que podem ocorrer, como sistema fora da temperatura ideal de trabalho, aumento de temperatura do pack e dificuldades de dissipar calor.

#### 4.8 FERRAMENTAS DE INOVAÇÃO

A aplicação das ferramentas de inovação tem o objetivo de obter novas soluções, aproveitar funções e características dos componentes e sistemas que não foram consideradas durante a concepção inicial do projeto. Partindo das ferramentas de análise de engenharia, tendo observado o comportamento dos componentes e subconjuntos, combinando análises macro e micro, são sugeridas algumas mudanças e adaptações em duas etapas. Inicialmente, qualquer inovação é bem-vinda, qualquer ideia pode ser considerada e é vista de maneira positiva por abrir o leque de possibilidades; num segundo momento, as ideias são separadas em duas categorias: mudanças propostas por inovação e por necessidade. As mudanças necessárias não são consideradas como inovativas, mas são classificadas como modificações. Finalmente, após montar as ferramentas, as propostas são avaliadas e, caso alguma modificação sugerida se mostre mais vantajosa que o modelo original, tomará o lugar de sistema usado a partir dali.

##### 4.8.1 Scamper

Ferramenta muito utilizada para inovar sistemas, produtos e serviços, o SCAMPER é construído seguindo o significado das letras que compõem o acrônimo. Substituir, Combinar, Adaptar, Modificar, Por para outro uso, Eliminar e Reverter. Cada letra força o autor a pensar

fora da caixa e utilizar seus conhecimentos do sistema e dos componentes para criar e aproveitar funções e características.

Figura 25 – Método SCAMPER

<b>S</b>	<b>Substituir</b>	<b>Substituir o termopar por um termistor</b>
<b>C</b>	<b>Combinar</b>	<b>Facilitar a interação entre a tomada de dados e o sistema de controle</b>
<b>A</b>	<b>Adaptar</b>	<b>Utilizar a leitura dos termistores para o BMS (regulamento)</b>
<b>M</b>	<b>Modificar</b>	<b>Revestir o container com PCM para reduzir a temperatura</b>
<b>P</b>	<b>Por p/ outro uso</b>	<b>O BTMS pode adquirir dados para melhor desempenho</b>
<b>E</b>	<b>Eliminar</b>	<b>Eliminar modificadores de fluxo de ar</b>
<b>R</b>	<b>Reverter</b>	<b>Desligamento do sistema de ventilação para aquecimento</b>

Fonte: Autores

Foi proposto substituir o sensor de temperatura, de um termopar para um termistor; combinar o sensor e o sistema de controle, usando componentes que se comunicam facilmente; ao permitir que o sistema de arrefecimento se comunique diretamente com o BMS, este fica mais robusto e mais adaptado a reconhecer comportamentos e evitar situações críticas; modificar a camada mais externa do container para que possa acomodar uma camada de PCM, o que poderia retirar mais calor do container; se o BTMS pode proporcionar condições de funcionamento melhores, pode proporcionar uma melhor performance para o carro durante as provas da competição; se inicialmente foram considerados modificadores do fluxo de ar no interior do pack, por exemplo geradores de vórtices, essa estratégia foi deixada de lado e os geradores de vórtice, eliminados; por fim, se as ventoinhas servem para melhorar a ventilação do pack e provocar trocas de calor mais eficientes, o desligamento do sistema provoca efeitos opostos, ou seja, se a bateria estiver fria, o sistema é desligado para piorar a troca de calor com o ar e aquecer a célula até a temperatura ideal.

#### 4.8.2 Matriz morfológica

Da mesma forma que foi usado o método SCAMPER, a matriz morfológica, ou quadro morfológico, também tem o objetivo de buscar novas formas de obter os resultados propostos, mas de uma forma mais livre. O próprio autor monta a matriz com as funções do sistema ou componente, e propõe ideias e soluções para cada, como uma folha em branco. Novamente,

sem se preocupar muito em distinguir o que é puramente inovativo e o que é necessário num primeiro momento.

Fornecimento de fluxo de ar, modificar o fluxo de ar dentro do pack, monitoramento térmico, fornecimento de energia, conversor de energia e a forma de controlar o sistema, foram as funções colocadas em discussão, e a partir delas, foram propostas soluções e ideias para se obter o objetivo de cada função.

Figura 26 – Matriz Morfológica

Funções	Soluções Parciais (conhecidas ou possíveis)				
Fornecer fluxo de ar	Ventoinhas	Aberturas passivas	Venturi na entrada	Turbina	
Modificar o fluxo de ar dentro do pack	Nenhum	Aberturas no container	Geradores de vórtices	Dutos internos nas saídas das ventoinhas	Utilizar as próprias células como flaps
Monitoramento térmico	Termopar	Termistor	Câmera térmica		
Fonte de energia	Bateria de propulsão 300V	Bateria dos sistemas 12V	Recuperação de energia cinética	Bateria específica	
Conversor de energia	Regulador	Gerador	Nenhum		
Controle do sistema	Código P.I.	C++	On/Off	Código Fuzzy	Código P.I.D.

Fonte: Autores

#### 4.9 MODELOS CONSIDERADOS

A partir do preenchimento da matriz, o autor escolhe conjuntos de soluções para se tornarem modelos do sistema. Nesse momento é feita a avaliação do que é imprescindível para a operação do sistema e quais propostas são inovativas. Então, tendo a matriz montada, foram destacados quatro modelos, o inicial e outros três novos.

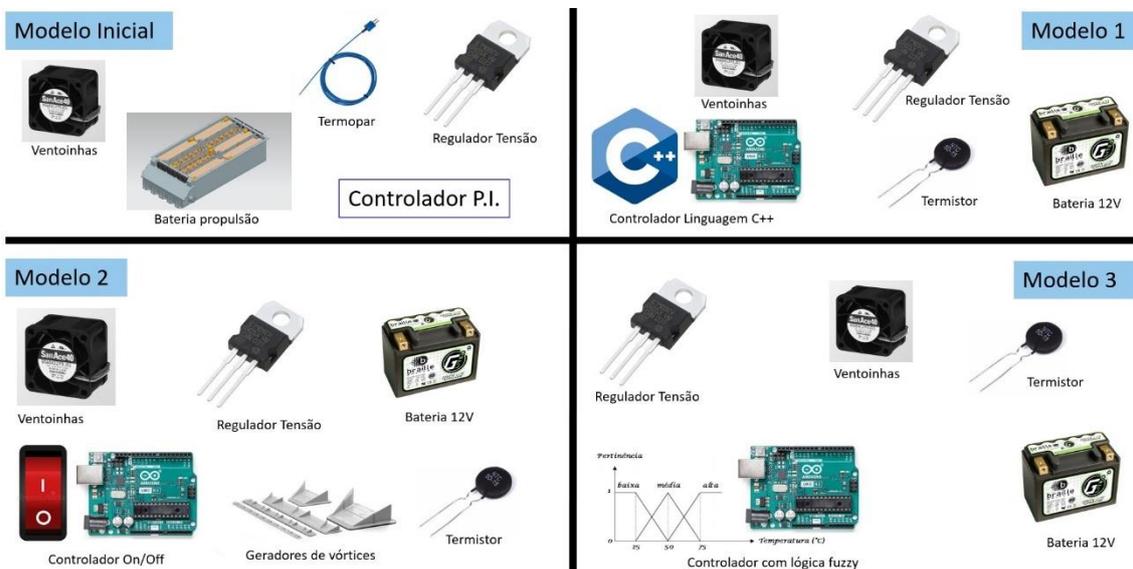
Figura 27 – Modelos considerados

Funções	Soluções Parciais (conhecidas ou possíveis)					
Fornecer fluxo de ar	Ventoinhas	Aberturas passivas	Venturi na entrada	Turbina		
Modificar o fluxo de ar dentro do pack	Nenhum	Aberturas no container	Geradores de vórtices	Dutos internos nas saídas das ventoinhas	Utilizar as próprias células como flaps	
Monitoramento térmico	Termopar	Termistor	Câmara térmica			
Fonte de energia	Bateria de propulsão 300V	Bateria dos sistemas 12V	Recuperação de energia cinética	Bateria específica		
Conversor de energia	Regulador	Gerador	Nenhum			
Controle do sistema	Código P.I.	C++	On/Off	Código Fuzzy	Código P.I.D.	
	Modelo Inicial	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3		

Fonte: Autores

Para melhor visualização, os modelos propostos, incluindo o inicial, são mostrados abaixo com seus componentes.

Figura 28 – Componentes dos modelos considerados



Fonte: Autores

#### 4.10 MATRIZ DE DECISÃO DOS MODELOS

A etapa final da aplicação das ferramentas de inovação é a avaliação dos modelos propostos. Se um deles for avaliado de forma mais positiva que o modelo inicial, de referência, e se todos os componentes e soluções propostas forem factíveis, o modelo proposto é adotado para ser usado no restante do desenvolvimento. A avaliação, assim como para selecionar o

fluido de arrefecimento, é feita pela matriz de decisão, com os pesos intactos e com novos critérios avaliativos específicos para esta aplicação.

Tabela 6 – Matriz de decisão dos modelos

Critérios	Peso do critério	Referência: Modelo inicial	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
Massa do Sistema	<b>3</b>	0	-1	-1	-1
Eficiência na Troca de Calor	<b>3</b>	0	2	1	2
Quantidade de Componentes	<b>1</b>	0	-1	-2	-1
Consumo de Energia	<b>2</b>	0	-1	-1	-1
Complexidade do sistema	<b>1</b>	0	-1	-2	-2
Nível de controle	<b>3</b>	0	2	2	2
RESULTADO:	-	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>4</b>

-2

Muito Pior

-1

Pior

0

Igual

1

Melhor

2

Muito Melhor

Fonte: Autores

Como mostrado na tabela, o modelo selecionado é o “modelo 1”, por possuir características inovativas bem combinadas às características necessárias.

#### 4.11 DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES

Conforme selecionado modelo 1, após a análise feita nas ferramentas utilizadas como scamper, quadro morfológico e a matriz de decisão dos modelos, pode-se dimensionar os componentes do modelo utilizado no projeto:

Bateria do modelo Braille Battery G lite + G5S 113x60x86 mm com as seguintes especificações: tensão de 12 Volts e capacidade de 5 Ah.

Ventoinhas do modelo San Ace 40 9 GA type Low Power consumption Fan 40x40x28 mm, com as seguintes especificações:

Tabela 7 – Especificações técnicas das ventoinhas selecionadas

Ciclo de Trabalho	0%	100%
Corrente Nominal	0,05 A	0,49 A
Velocidade Nominal	4500 rpm	18000 rpm
SPL	535 Pa	33 Pa
Max. Pressão Estática	54 dB	22 dB
Temperatura de Operação	-20 °C a 70°C	
Tensão Nominal	12 V	
Potência de 1 unidade	3,24 W	
Potência de 12 unidades	38,88 W	
Vazão de 1 ventoinha	0,415 m <sup>2</sup> /s	
Vazão de 12 ventoinhas	4,98 m <sup>2</sup> /s	
Diâmetro do Rotor	19 mm	

Fonte: Sanyo Denki, 2022

Micro controlador Arduíno UNO com as características:

Tabela 8 – Especificações técnicas do controlador selecionado

Modelo do Micro Controlador	ATmega328
Tensão de Funcionamento	5 V
Tensão de Entrada (recomendada)	7 V a 12 V
Tensão de Entrada (limites)	6 V a 20 V
Digital I/O	14 (dos quais 6 oferecem saída PWM)
Pinos de Entrada Analógica	6
Corrente DC por I/O	40 mA
Corrente DC no pino 3,3 V	50 mA
Memória Flash	32 kB (dos quais 0,5 são usados pelo carregador de inicialização)
SRAM	2 kB
EEPROM	1 kB
Clock	16 MHz

Fonte: Arduino, 2017<sup>1</sup>

Termistores do modelo NTC 5D15, com as características;

Tabela 9 – Especificações técnicas do sensor de temperatura selecionado

Resistência a 25°C	5 Ω
Máx. Corrente no Estado Estacionário a 25°C	6 A
Dissipação Térmica Constante	20 mW/°C
Tempo Térmico Constante	76 segundos
Intervalo de Temperatura	- 55 °C a 220 °C

Fonte: Exsense, 2022<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Informações adquiridas pela ficha técnica dos componentes presente na embalagem do componente adquirido pelo grupo.

<sup>2</sup> Informações adquiridas pela ficha técnica dos componentes presente na embalagem do componente adquirido pelo grupo.

Além dos componentes citados acima, também foram utilizados os chicotes elétricos e os conectores para fazer toda a ligação do sistema.

#### 4.12 FMEA

A Análise de Modo de Falha e Efeito (*failure mode and effect analysis*) é uma metodologia que permite identificar, avaliar e prevenir contra possíveis falhas potenciais ou conhecidas do produto e os efeitos de sua ocorrência. A partir da avaliação, é possível detectar suas causas e efeitos no desempenho dos sistemas, processos ou produtos, além de determinar os impactos sobre o cliente, também pode ser interessante para definir antecipadamente a probabilidade de falhas e evitar diferentes tipos de problemas.

Essa ferramenta é utilizada para garantir que as possíveis falhas de projeto ou processos sejam consideradas e minimizadas. Ao analisar uma ou mais falhas por completo, pode-se priorizá-las pelas suas características e em seu impacto.

O método FMEA pode ser usado tanto para sistemas, processos, produtos e projetos. Inicia-se a aplicação pelo modo de falha de um componente. O efeito da falha diz respeito às consequências que esses erros trazem para os processos, portanto, deve-se determinar as indicações de deficiência cuja consequência é o modo de falha, ou seja, identificar a origem de cada modo de falha (a causa), que devem ser avaliados e classificados quanto a sua probabilidade. Essa análise irá definir o sistema de prioridades. Após esse estudo, é necessário avaliar a severidade, ocorrência, e detecção onde também será atribuída uma nota para cada um desses itens utilizando uma escada crescente de 1 até 10:

- a) **severidade:** avalia o nível de impacto do efeito da falha no cliente, quanto maior a probabilidade de atingir o cliente, maior o valor nessa avaliação;
- b) **ocorrência:** probabilidade de ocorrência das causas ou dos modos de falha, ou seja, quantas vezes isso já aconteceu ou pode acontecer. Quanto maior a probabilidade da causa existir e gerar falha, maior o valor nessa avaliação;
- c) **detecção:** probabilidade de uma falha ser detectada antes de chegar ao cliente, a partir dos mecanismos de controle atuais da empresa. Quanto maior a probabilidade da falha ser detectada antes de chegar ao cliente, MENOR o valor nessa avaliação.

Posteriormente, encontra-se o número de prioridade de risco ou RPN (*Risk Priority Number*), ao atribuir um valor à análise.

$$\text{RPN} = \text{Severidade} \times \text{Ocorrência} \times \text{Detecção}$$

A partir da priorização, o resultado será o índice de risco, aqueles com o maior total serão as prioridades para adoção de medidas por apresentarem maior gravidade e probabilidade e menor detectabilidade. Deve-se propor ações recomendadas que sejam corretivas ou preventivas, visando otimizar os índices de severidade, ocorrência e detecção.

A análise pela ferramenta FMEA de todos os componentes que compõem o *boundary diagram* do trabalho, permitiu indicar quais itens precisam de maior atenção quando executados. No sistema B.cooler, cinco equipamentos possuem um maior RPN: chicote, termopar, fluido de arrefecimento, conectores e unidade de controle, a ferramenta nos permitiu definir as ações que possuem como objetivo corrigir determinados modos de falha.

#### 4.13 CANVAS DE NEGÓCIO

É uma ferramenta prática de organização de modelos de negócios que contém um resumo dos principais pontos de planejamento e que pode ser utilizada na criação de uma nova empresa ou em uma organização. Bastante eficiente, o Canvas ajuda melhorar a visualização de questões estratégicas do negócio e possui 9 etapas, que englobam quatro áreas principais da organização: clientes, oferta, infraestrutura e viabilidade financeira. Para a construção do Canvas de negócio, é preciso seguir uma ordem de montagem específica como é mostrado:

- a) Segmentos de clientes: são coletadas informações sobre os clientes que o negócio ou o projeto atende;
- b) Oferta de valor: é o modo como a empresa se propõe a resolver um problema ou atender a uma necessidade do cliente;
- c) Canais: são os meios utilizados pela empresa para que o produto chegue aos seus clientes;
- d) Relacionamento com o cliente: é o tipo de relação que a empresa estabelece com os seus clientes, assim como as formas que serão usadas para atraí-los;
- e) Fontes de receitas: é a forma como a empresa irá obter lucro através do segmento de clientes;
- f) Principais recursos: são recursos indispensáveis para validar o modelo de negócio;
- g) Atividades chave: principais atividades que a empresa deverá exercer para garantir que o modelo de negócio seja implementado;
- h) Parceiros chave: serviços contratados essenciais para o desenvolvimento do negócio, como fornecedores, parceiros;

- i) Estrutura de Custos: quanto é necessário investir para desenvolver o modelo de negócios.

O *Business Model Canvas* do grupo B.cooler está direcionado da seguinte maneira:

#### **4.13.1 Seguintos de clientes**

O sistema B.cooler atende o mercado do setor automotivo voltado para veículos elétricos como motocicletas elétricas, veículos de passeio, especiais, pesados de transporte urbano, comerciais, segmentos de veículos levíssimos elétricos e também as equipes da Fórmula FSAE.

#### **4.13.2 Oferta de valor**

O projeto tem como finalidade utilizar sistemas de controle térmico para aumentar a eficiência de baterias elétricas e também aumentando a performance do veículo nas pistas de corridas e, conseqüentemente, equipes de competição profissional ou amadoras.

#### **4.13.3 Canais**

As principais maneiras para os nossos clientes encontrarem o produto seriam na internet por meio do website oficial e redes sociais ou através de congressos e feiras.

#### **4.13.4 Relacionamento com o cliente**

Para atender o cliente, é disponibilizado um atendimento personalizado, assim como uma gestão através da cocriação.

#### **4.13.5 Fontes de receitas**

Para a fonte de receita, é disponibilizada a venda do projeto.

#### **4.13.6 Recursos chave**

Para o projeto funcionar, alguns recursos foram indispensáveis, softwares de simulação, modelagem e programação (Ansys, CAD, Matlab), instrumentos e equipamentos para testes de protótipo.

#### **4.13.7 Atividades chave**

Para que o modelo de negócio ser implementado, algumas atividades são fundamentais como, projetar sistemas de arrefecimento, efetuar simulações e dimensionamentos, realizar testes dinâmicos e de bancada, prospecção de clientes e divulgação.

#### **4.13.8 Parceiros chave**

Os parceiros necessários para a validação do modelo de negócio seriam, empresas de softwares de simulação, empresas do ramo de sistemas de ventilação e bombeamento, fabricantes de fluidos de arrefecimento, fabricantes de baterias, empresas de instrumentação, empresa de testes e ferramentas de controle.

#### **4.13.9 Estrutura de custos**

Para operar o modelo de negócios, os custos são divididos em dois tipos, fixos, aluguel de softwares, mão-de-obra e escritório de engenharia e variáveis, viagens comerciais, componentes para protótipos e área de testes.

### **4.13 CANVAS DE PROJETO**

O Canvas de Projeto, foi desenvolvido e montado para que conseguimos acompanhar e pontuar a evolução do projeto, e verificar se está de acordo com o planejado.

Através do mesmo temos uma melhor compreensão das principais informações sobre o projeto, por meio de mapas, trazendo melhor comunicação e visualização das informações, melhor alinhamento e conseqüentemente aumento do desempenho das atividades realizadas na seqüência.

O propósito do projeto é solucionar o problema do aquecimento das baterias, que atingir temperaturas fora da faixa ideal, que reduz a potência do veículo elétrico (Fórmula E). Outro ponto é que podemos atingir outros públicos que nossa expertise, aumentando ainda mais o leque de clientes.

O projeto tem como objetivo conseguir deixar a bateria trabalhando na faixa de temperatura ideal, que seria entre 15° a 35° neste, e conseqüentemente trazer potência estável ao carro em situações mais críticas.

Para obtermos sucesso precisamos avaliar fatores essenciais para sustentabilidade do negócio, como a parametrização do sistema, garantia de que as baterias vão operar dentro da faixa de temperatura ideal, e aplicação de teste periódicas.

Buscando um negócio saudável, foi definido quem está no desenvolvimento de projeto e quem são os clientes finais.

O projeto surgiu sob a justificativa de alta demanda de EV, mercado carente de gerenciamento térmico e benefícios para o FSAE. Com o objetivo de criar um sistema de arrefecimento para as baterias do F-FEI, que melhore seu funcionamento e obedeça ao regulamento vigente. O projeto conta também com alguns benefícios, como por exemplo, prevenção contra thermal runaway, maior durabilidade, maior controle de funcionamento da bateria e aumento da autonomia.

O produto utiliza de uma metodologia de projeto de um sistema de arrefecimento para as baterias do FSAE FEI Elétrico. Foi seguido os requisitos necessários para desenvolvimento, tais como o regulamento das competições SAE, arrefecimento via ventilação para as baterias, bom funcionamento nas competições, baixo acréscimo de massa ao veículo, fácil manutenção, menor custo e sem comprometer a integridade da bateria.

Como stakeholders temos a Equipe Fórmula FEI, o grupo B-Cooler e os professores envolvidos no TCC e na equipe do Fórmula. A equipe foi dividida em cinco áreas, sendo elas, Marketing & Custos, Modeling & Simulation, Projeto, Protótipos e Testes Dinâmicos.

Seguimos as restrições impostas, respeitando o regulamento SAE, o peso do carro e a vedação necessária para impedir a entrada de líquidos e partículas sem prejudicar a entrada e saída de gases.

Foi projetado um sistema complacente às regras e eficiente ao mesmo tempo, melhorando o funcionamento da bateria.

Como todo projeto, estamos suscetíveis a alguns riscos caso o sistema seja projetado de maneira inadequada ao regulamento, ou seja, ineficaz ou ainda, não alcance os objetivos esperados.

## **5 CÁLCULO DA MELHORIA PROPOSTA**

Tendo construído a estratégia de abordagem do problema e feitas todas as ponderações, chega-se ao ponto de tratar, justamente, dos objetivos pretendidos com este estudo. É necessário apontar que, inicialmente, se propõe resultados e impactos baseados na literatura disponível e na noção que se tem de como se comporta o veículo e seu conjunto de baterias. Em um segundo momento, são analisadas simulações e, quando possível, de testes e dados aquisitados, a respeito da aplicação do sistema proposto e seus impactos. O amálgama de informações permite que se possa comparar a situação de referência, sem o sistema proposto,

com a situação modificada, com o sistema em operação, e a comparação permite avaliar a profundidade das mudanças propostas e servem como fonte de dados para futuros estudos.

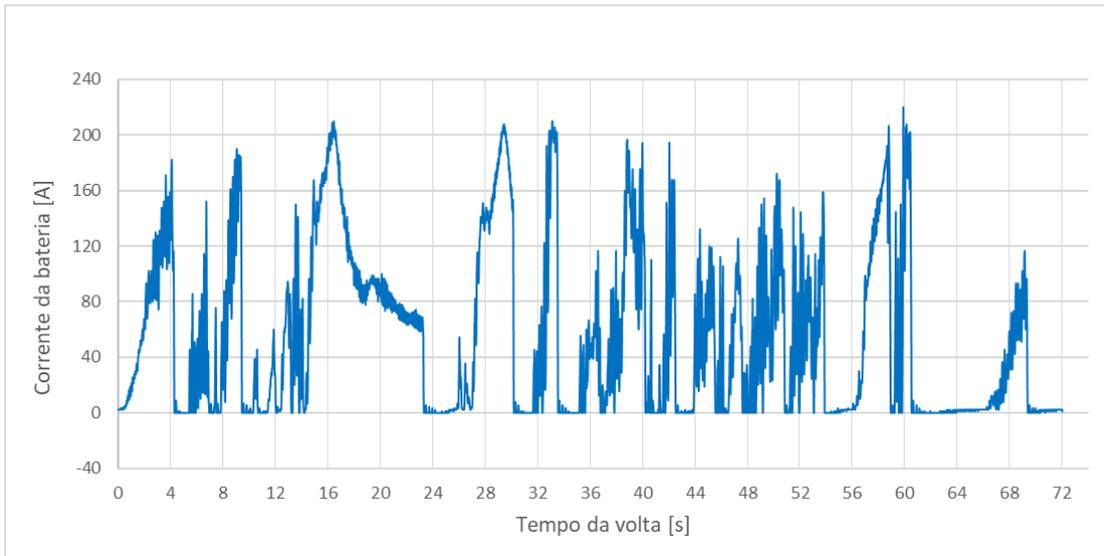
### 5.1 TARGET

O endurance, ou autocross, é a prova mais longa da competição, chegando a durar uma hora. Por isso é a que demanda o uso contínuo por mais tempo, da bateria e do sistema de arrefecimento. Como a prova costuma durar cerca de uma hora, esses 60 minutos são a referência de 100% do tempo de uso da bateria. Ao analisar o gráfico de descarga de corrente de uma volta do carro no kartódromo de Piracicaba (ECPA), pode-se obter a faixa de temperatura onde o carro permanece por mais tempo, e assim, estipular o objetivo do sistema em agir durante a porcentagem do tempo correspondente a tal faixa de corrente, a fim de manter as células operando na faixa de temperatura de 15° e 35° C. Vale notar que as provas de autocross e aceleração são as que demandam as maiores taxas de descarga das baterias, cerca de 20C. Por trabalharem a 320 VDC chegam a provocar picos de tensão de 400V e entregam aproximadamente 52 kJ de energia.

Worwood et al (2016) mostra que uma célula sendo descarregada a uma taxa 3C demorou 18 minutos para atingir cerca de 35°C, no melhor caso testado onde houve convecção forçada. Já Sun e Dixon (2014), mostraram que, para um perfil de fluxo em U, a célula mais quente chegou em 35° em cerca de 22 minutos e a mais fria em 1h 6min; já no perfil de fluxo em Z, uma célula chegou aos 35°C em 33 minutos e a última célula da série, nunca atinge tal temperatura. Tais temperaturas são tomadas como referência de acordo com o mencionado no item 2.2, onde há citação de alguns artigos que indicam tal intervalo como sendo o mais propício.

Tomando posse dos dados fornecidos pela equipe FSAE FEI Elétrico que registram uma volta do modelo de 2018 no kartódromo ECPA, é possível obter um gráfico de corrente versus tempo, ou seja, a corrente que foi demandada do veículo durante todo o tempo da volta.

Figura 29 – Gráfico de corrente versus tempo em uma volta no ECPA



Fonte: Autores

A partir do gráfico plotado, foi montada uma tabela que divide os valores de corrente da volta em cinco (5) faixas. Visto que o projeto tem o propósito de aumentar o período de trabalho da bateria dentro do intervalo ótimo de temperatura, por meio da melhora das condições de troca térmica, usando as cinco faixas de corrente, é possível escolher uma que represente uma boa porção do tempo da volta e possa ser a referência do tempo que o sistema deve permanecer entre os 15°C a 35°C estipulados.

Tabela 10 – Referência de tempo em cada faixa de corrente

Faixa de corrente	Corrente [A]		Tempo em cada faixa [s]	% tempo	% tempo acumulado
	De (>)	Até (≤)			
Faixa 1	0	44	40	55%	55%
Faixa 2	44	88	13	18%	73%
Faixa 3	88	132	9	13%	86%
Faixa 4	132	176	7	9%	95%
Faixa 5	176	220	4	5%	100%

Fonte: Autores

A partir dos dados mostrados, tanto no gráfico quanto na tabela, é possível observar que o carro permanece na faixa de 0 a 44 Ampères durante 55% do tempo da volta. Tal faixa se torna uma referência interessante tanto pela porção do tempo que toma, quanto pelo valor de

corrente máxima, que não representa um valor exagerado nem um valor baixo demais para se tornar relevante; é um intervalo razoável e de bom potencial.

Segundo consta na ficha de dados da fabricante, as células do carro têm a taxa de descarga de 1C equivalente a 7,05A. seguindo a proporção, a corrente de 44A, observada durante a volta, equivale a uma taxa de descarga de 6,24C. Valor que, assim como a faixa de temperatura escolhida, está bastante alinhado com o que se vê na literatura relacionada ao meio automotivo. Desta forma, o objetivo do projeto é manter as baterias operando por 55% do tempo de uma hora, ou seja, 33 minutos, dentro do intervalo de temperatura que vai de 15°C a 35°C.

## 5.2 PROCEDIMENTOS DAS SIMULAÇÕES

O processo de simulação, cálculos de desempenho das mudanças propostas e comparativos com os modelos de referência, se inicia pelo direcionamento de como serão desenvolvidas as simulações. Quais os melhores caminhos a serem tomados e quais aspectos devem ser levados em conta para cada simulação, a fim de se otimizar o uso dos recursos disponíveis e buscar os melhores resultados dentro das limitações presentes.

### 5.2.1 Procedimento adotado

Testes práticos e simulações devem caminhar juntos sempre que possível. Reproduzir na prática os testes realizados em computador, permite que os resultados e comportamentos possam ser comparados e validados. Se as condições forem iguais nos dois ambientes (real e virtual) e os resultados forem semelhantes, significa que as simulações são confiáveis e podem ser usadas para testes mais complexos sem que haja a necessidade imediata de se realizarem testes em paralelo; o desenvolvimento somente pelas simulações, apesar de não ser o ideal, é notavelmente menos custoso.

Neste trabalho, os testes das mudanças propostas tiveram de ocorrer, em sua totalidade, no ambiente virtual, pois não havia recursos disponíveis para testar as células em regimes de descarga que produziriam resultados comparáveis aos das simulações.

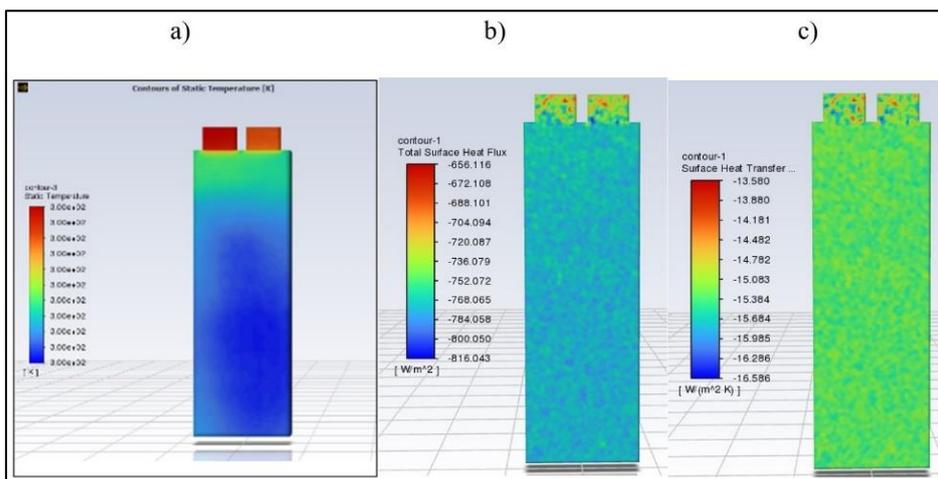
Foi adotado o software Ansys, sistema de análise Fluid Flow CFX para os estudos de trocas térmicas e interação com o ar, e Fluid Flow Fluent, para os estudos iniciais de geração de calor de uma célula operando com geração eletroquímica. O CFX é bastante conhecido e produz resultados e análises bem aceitas no meio acadêmico; o Fluent possui um modelo padrão de célula eletroquímica modificável e basta seguir os passos do tutorial fornecido pela própria Ansys para simular.

As simulações são alimentadas por duas fontes: a partir das informações que se tem do carro real, e buscas na literatura por artigos que contenham modelos de células semelhantes ao usado pela equipe FSAE FEI, sendo testados de maneira semelhante ao que se vê nas competições. Buscar na literatura pode soar contraintuitivo, mas devido à precisão e rigorosidade com que são feitos os artigos, usá-los como referência e fonte de dados é bastante plausível e confiável. Vale ressaltar que, os dados fornecidos pela equipe FEI, por serem de modelos anteriores, são apenas referências e servem como base de comparação, apenas para que se tenha um valor com o qual iniciar as simulações; o mesmo pode ser dito aos dados da literatura.

### 5.2.2 Simulação do funcionamento de uma célula

Optou-se pela simulação de uma única célula, pois seria um primeiro passo simples, que produziria dados verificáveis e que poderiam ser utilizados, em escalas aumentadas, em outras etapas das simulações. Para simular o funcionamento de uma célula, no início do processo, o objetivo era apenas completar o tutorial corretamente e obter a simulação do modelo padrão do Ansys, e notar quais são os resultados obtidos. O comportamento da célula modelo e quais as grandezas dos parâmetros que serão observados futuramente, são boas referências para os próximos passos. A partir desse ponto, altera-se alguns pontos do modelo para que a simulação reproduza um comportamento próximo ao real.

Figura 30 – Simulação do comportamento térmico de uma célula



Fonte: Autores

Na figura acima, nota-se a tendência pelo aquecimento concentrado nos conectores das células. Em a), tem-se a temperatura, em Kelvin, mas como a resolução da escala está baixa, não são detectadas diferenças numéricas, apesar de serem notadas visualmente. Em b), observa-

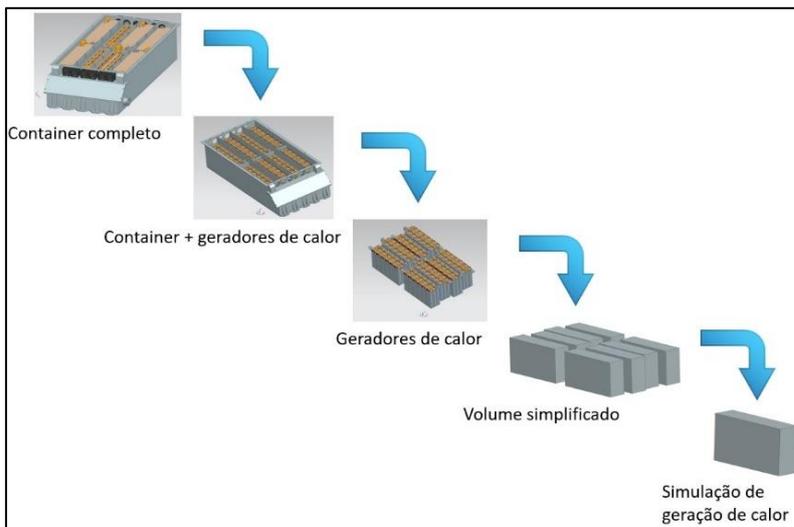
se que o fluxo de calor superficial ( $W/m^2$ ) tem seus maiores valores nos conectores, o que se repete em c), onde é mostrada a transferência de calor superficial ( $W/m^2 \cdot K$ ).

### **5.2.3 Simulações da troca de calor e aerodinâmica dentro do container**

De início, ao olhar para o container com todos os seus componentes internos devidamente instalados, nota-se a quantidade bastante elevada de partes, geometrias, diferenças de tamanhos e montagem compacta. Tudo isso é necessário, cada componente tem sua função e ocupa apenas o espaço necessário, sem sobressalências e excessos. Do ponto de vista da simulação, as diferentes geometrias, tamanhos e o próprio número de componentes formam um desafio. A malha deve ser ajustada, basicamente de forma individual, o que toma muito tempo; as diferenças de grandeza entre componentes tornam os resultados mais difíceis de serem obtidos e menos constantes, o que diminui a confiabilidade. A fim de contornar tais dificuldades, se faz o uso de simplificações geométricas, desde que sejam razoáveis, e que não alterem a dinâmica geral das trocas térmicas e de como se propaga o ar.

Partindo de um container cheio de componentes variados, e com o objetivo de deixar apenas os componentes responsáveis pela geração de calor, chega-se na simplificação de um conjunto de baterias no formato de um bloco. Tal simplificação só é possível devido ao fato de ser imprescindível para o bom funcionamento de células de lítio tipo pouch, que elas sejam posicionadas de forma compacta e em contato direto, umas contra as outras ou contra anteparos rígidos, pressionadas. Para que se evite o estufamento e a degradação acelerada. Por conta da simplificação, e valendo-se dos dados obtidos pela equipe e pela literatura, é simples fazer o cálculo de geração de calor. Basta obter a geração de um bloco simplificado, e multiplicar pela quantidade de blocos. O valor não será exatamente igual ao que se vê na realidade, mas por ser ligeiramente maior (condição mais crítica que a realidade), a simulação serve como um coeficiente de segurança.

Figura 31 – Simplificação da geometria dos componentes internos do container



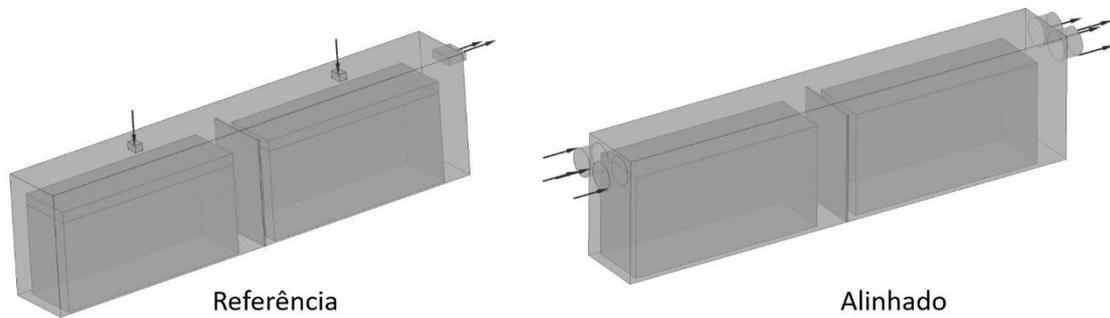
Fonte: Autor “adaptado de” Equipe FSAE FEI Elétrico, 2022

As simplificações dos componentes internos para o formato de blocos, paralelepípedos regulares, também é válida para as simulações do comportamento do ar dentro do container. Devido ao fato de as células serem posicionadas juntas, pressionadas umas contra as outras, e serem cercadas por Celeron, deixa o formato, mesmo no carro real, muito semelhante ao da forma regular; a maior diferença irá ocorrer na parte superior, onde estão os conectores e barramentos, onde a geometria é irregular, mas será feita esta simplificação tendo em vista a administração de recursos disponíveis, e devido ao fato de que uma simulação com uma boa camada limite, pode representar melhor uma situação real, que uma simulação com a geometria mais parecida.

Assim, foram propostas duas situações de testes diferentes. A primeira, de referência, se assemelha com a condição vista no container do modelo atual usado pela equipe (RB8), onde há pouca ventilação e entradas pequenas localizadas acima dos conjuntos de células, e a proposta de mudança, a ventilação chamada de “alinhada”, onde as ventoinhas de entrada se localizam alinhadas às ventoinhas de saída, em paredes opostas do container.

As simulações em si ocorrerão em algumas situações diferentes que permitam a comparação entre os layouts de container e ventilação. Serão adotadas três temperaturas, dentro do intervalo térmico estipulado, e três velocidades que são observáveis durante as competições para ambos os modelos. São as temperaturas de 15°C, 25°C e 35°C, e as velocidades de 1 m/s, 6,17 m/s e 10 m/s. Os motivos para os valores serão explanados posteriormente.

Figura 32 – Condições de ventilação simuladas

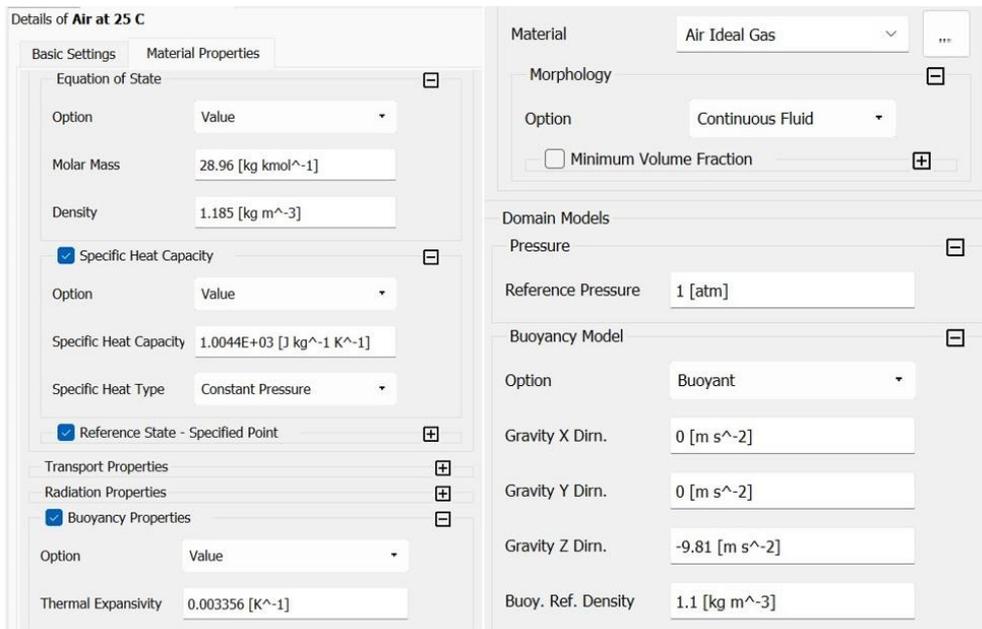


Fonte: Autores

Da mesma forma que a simplificação do formato externo dos conjuntos de células foi justificada, a escolha por simular apenas  $\frac{1}{4}$  (um quarto) do container também se mostra bastante razoável e favorável quando se pensa em gerenciar recursos. Considerando, inicialmente que as paredes internas do container estão em contato com a geração de calor em ambos os lados, e que a geração é praticamente igual para todos os conjuntos de células, pode-se considerar que as paredes são adiabáticas, pois o fluxo de calor em um lado é igual ao do outro lado da parede, tendo assim, uma simplificação devido à simetria do problema. Ainda, dois pacotes de células em série resultam no comprimento total do container e promovem condições diferentes de interação entre o ar e as células e seus conectores; à frente, o contato com o ar externo é favorável ao arrefecimento, e para o conjunto próximo à saída, o ar chega já aquecido pelo primeiro conjunto, ou seja, condição menos favorável, mas importante de ser observada.

Na figura acima pode-se observar um detalhe de grande importância para as simulações: a separação, entre a parte das células e a parte dos conectores e barramentos, nos blocos que representam os conjuntos de células. No Ansys, foram simuladas como sendo formadas por materiais diferentes, como são naturalmente. A seção das células, de 140mm de altura, recebeu os dados do Lítio, e a seção dos conectores, foi simulada com os dados do Cobre. A parede entre os conjuntos de células, seção estrutural do contêiner, é feita em alumínio. O ar, também teve suas propriedades moduladas para as simulações.

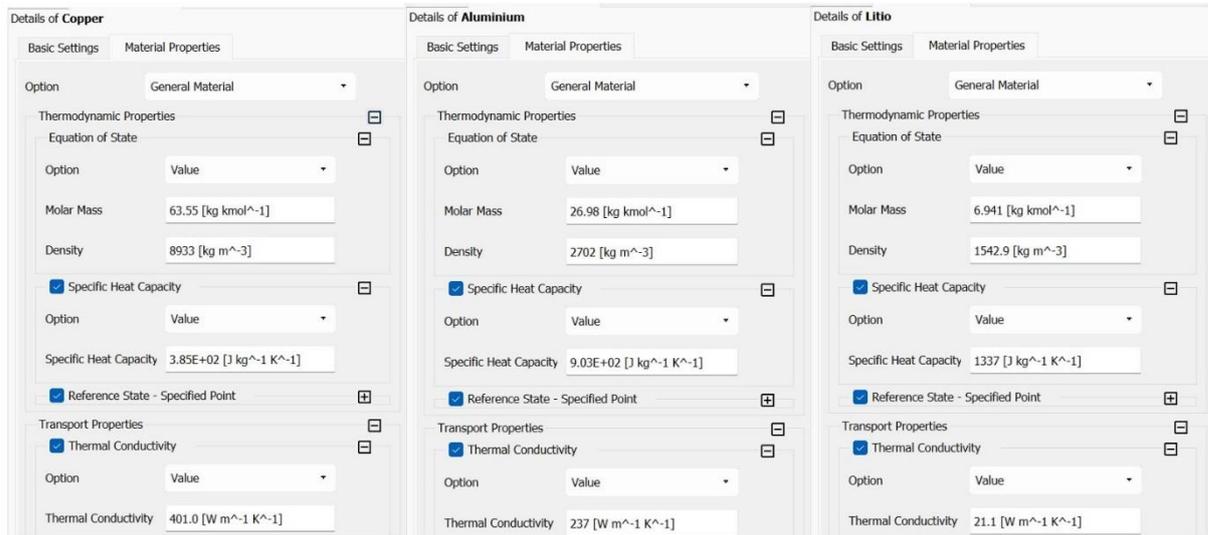
Figura 33 – Propriedades do ar no Ansys



Fonte: Autores “adaptado de” Setup Ansys 2022 R1

São mostradas as propriedades dos materiais dos componentes do conjunto de baterias.

Figura 34 – Propriedades dos materiais dos componentes da bateria no Ansys



Fonte: Autores “adaptado de” Setup Ansys 2022 R1

### 5.3 MODELAMENTO MATEMÁTICO

O meio de verificação e validação do projeto e objetivo propostos é a comparação matemática. Uma forma clara e sólida de se comparar a melhoria desenvolvida com o sistema existente; as características atuais com o objetivo buscado. Será apresentado o modelo matemático usado nos cálculos e simulações, as simplificações e condições de contorno consideradas, bem como os cálculos, resultados e próximos passos que outros grupos podem seguir.

#### 5.3.1 Descrição dos modelos

Serão considerados os seguintes modelos para o problema enfrentado: geração de calor, geração de carga elétrica e calor por efeito Joule. Adicionalmente, serão tomadas as seguintes hipóteses simplificadoras: (I) As células serão consideradas como sendo fontes de calor em vez de serem células ativas gerando carga elétrica (geração eletroquímica); (II) Células têm distribuição uniforme de calor na superfície e uma leve concentração calorífica na região dos conectores; (III) Simplificações geométricas para as simulações serão tomadas tais como as apresentadas anteriormente.

A simplificação da geração de calor reduz muito o tempo de modelagem e simulação por ser mais simples modelar as células apenas como fontes de calor do que mudar as configurações do modelo de bateria padrão do Ansys para que as células simuladas sejam mais semelhantes às usadas pelo FSAE FEI. O número de características e propriedades que devem ser alterados para completar a modelagem é consideravelmente menor ao considerar apenas a geração de calor e não mais o funcionamento eletroquímico do corpo. O ideal seria considerar todo o funcionamento das células, mas já para a simulação de apenas uma célula, se percebe a diferença de complexidade, e ao se adicionar células associadas, a dificuldade cresce. Apenas a geração de calor é uma simplificação razoável e coerente que leva a um caminho de solução mais direto.

Finalmente, devem ser respeitadas algumas condições de contorno. O sistema pode contar apenas com as propriedades características do ar para a troca de calor com as células; o ar escoar, partindo das ventoinhas pelo interior do container, que possui perfil retangular, e deve-se buscar permanecer dentro do intervalo de temperatura estipulado.

#### 5.3.2 Cálculos

De maneira simplificada, pretende-se calcular o balanço de energia, ou seja, o calor retirado deve ser aproximadamente igual ao calor gerado.

$$\sum Q_{gerado} \cong \sum Q_{retirado} \quad (1)$$

Como mencionado, será considerado, mesmo que de maneira breve, apenas como parametrização, o calor gerado por efeito joule:

$$Q = I^2 \times R \times t \quad (2)$$

Sabendo que a corrente é de 44A, a resistência interna da célula, segundo o fabricante, é de 1,8 miliohms, e uma volta no kartódromo ECPA dura cerca de 72 segundos, uma célula produz a energia:

$$Q = 44^2 \times (1,8 \times 10^{-3}) \times 72$$

$$Q = 250,91 \text{ J}$$

O total de células do acumulador de propulsão gera:

$$Q_{tot} = 250,91 \times 288$$

$$Q_{tot} = 72,26 \text{ kJ}$$

Um valor de potência para uma célula pouch de Li<sup>+</sup> encontrado por AN, Z. (2019), foi de 125 kW/m<sup>3</sup>. Devido às semelhanças da célula testada por ele e as usadas pela equipe FSAE FEI, foi assumida uma proporcionalidade que permite obter a potência de 130 kW/m<sup>3</sup>, visto que a célula da equipe descarrega a uma taxa de 6,24C. Assim, sabe-se que para um conjunto de 36 células, com volume aproximado de 3E-03 m<sup>3</sup>, a geração de calor é de 388,75 W, e para a seção simulada, que corresponde a ¼ do container, onde há dois conjuntos de células, a potência de geração de calor é de 777,50 W, para um volume combinado de 5,98E-03 m<sup>3</sup>. Para apenas uma célula, o valor é 7,4W.

Partindo da 1ª Lei da Termodinâmica:

$$\sum \dot{q} = m c \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

Pode-se obter o balanço de energia do problema pelo método ARC (accelerating rate calorimeter):

$$q = mc_p \frac{dT}{dt} + hA(T_{sup} - T_{well}) \quad (4)$$

Onde q é o calor gerado pela bateria (W), m é a massa do volume estudado (kg), c<sub>p</sub> é o calor específico do material da bateria, dT/dt é a taxa de aquecimento, A é a área superficial

de troca de calor,  $T_{\text{sup}}$  é a temperatura da superfície da bateria,  $T_{\text{well}}$  é a temperatura do ar que envolve a bateria e finalmente, o  $h$  é o coeficiente de convecção. Ele será determinado a partir da interação entre os números de Reynolds, Prandtl e Nusselt, que caracterizam o ar a certas condições. Método usado pelo Ansys para obter os valores das simulações.

Em situações em que há grande número de variáveis e condições diferentes, os adimensionais facilitam a obtenção de resultados e análises. São eles:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} = \frac{\rho v L_c}{\mu} \quad (5)$$

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu \times c_p}{k} \quad (6)$$

$$Nu = \frac{h L_c}{k} = C \times (Re^m) \times (Pr^n) \quad (7)$$

Onde a última expressão, de Nusselt, permite a integração entre Reynolds e Prandtl, desde que se saiba os valores dos coeficientes  $C$ ,  $m$  e  $n$ , que decorrem do tipo de escoamento observado.

Para determinar os coeficientes da expressão de Nusselt, é necessário possuir as propriedades do ar nas temperaturas desejadas, a faixa de Reynolds do escoamento do ar, e as características do escoamento. O problema todo gira em torno da ventilação das células, e a partir disso, entende-se duas informações: convecção forçada e escoamento cruzado. A partir das duas informações, pode-se recorrer às tabelas que caracterizam, as propriedades do ar, o perfil de escoamento e as diferentes combinações possíveis, presentes em ÇENGEL (2012), onde são fornecidos os diferentes coeficientes buscados. Basta perceber que a combinação procurada é o escoamento cruzado em torno de um prisma de seção quadrada.

Tabela 11– Propriedades do ar a 1 atm de pressão

Propriedades	$k$	$\rho$	$c_p$	$\alpha$	$\mu$	$\nu$	Pr
	Condutividade térmica	Densidade	Calor específico	Difusividade térmica	Viscosidade dinâmica	Viscosidade cinemática	Número de Prandtl
Unidades	W/m.K	kg/m <sup>3</sup>	J/kg.K	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	kg/m.s	m <sup>2</sup> /s	-
15°C	0.02476	1.225	1.007	2.009E-05	1.802E-05	1.470E-05	0.7323
25°C	0.02551	1.184	1.007	2.141E-05	1.849E-05	1.562E-05	0.7296
35°C	0.02625	1,145	1.007	2.277E-05	1.895E-05	1.655E-05	0.7268

Fonte: Autor “adaptado de” ÇENGEL, 2012

O tipo de escoamento a ser estudado é dado em função do número de Reynolds, mostrado na tabela a seguir. O escoamento será laminar, visto que o maior número de Reynolds para as simulações é de pouco menos de 13.000.

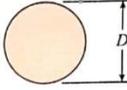
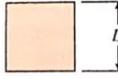
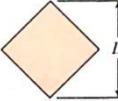
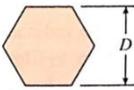
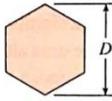
Tabela 12 – Determinação do tipo de escoamento pelo número de Reynolds

<b>Tipo de escoamento</b>	<b>Faixa de Re</b>
Laminar	$Re < 500.000$
Crítico	$Re = 500.000$
Turbulento	$Re > 500.000$

Fonte: Autor “adaptado de” ÇENGEL, 2012

Por fim, analisa-se a natureza da convecção forçada, utilizando a tabela a seguir, sabendo que o escoamento é cruzado e a seção transversal do cilindro é quadrada sem inclinação e a faixa de Reynolds é laminar, conforme visto.

Tabela 13– Número de Nusselt médio para convecção forçada em escoamento cruzado

TABELA 7-1			
Correlações empíricas do número de Nusselt médio para convecção forçada sobre cilindros circulares e não circulares em escoamento cruzado (de Zukauskas, 1972 e Jakob, 1949)			
Seção transversal do cilindro	Fluido	Faixa de Re	Número de Nusselt
	Gás ou líquido	0,4-4	$Nu = 0,989Re^{0,330} Pr^{1/3}$
		4-40	$Nu = 0,911Re^{0,385} Pr^{1/3}$
		40-4.000	$Nu = 0,683Re^{0,466} Pr^{1/3}$
		4.000-40.000	$Nu = 0,193Re^{0,618} Pr^{1/3}$
		40.000-400.000	$Nu = 0,027Re^{0,805} Pr^{1/3}$
	Gás	5.000-100.000	$Nu = 0,102Re^{0,675} Pr^{1/3}$
	Gás	5.000-100.000	$Nu = 0,246Re^{0,588} Pr^{1/3}$
	Gás	5.000-100.000	$Nu = 0,153Re^{0,638} Pr^{1/3}$
	Gás	5.000-19.500 19.500-100.000	$Nu = 0,160Re^{0,638} Pr^{1/3}$ $Nu = 0,0385Re^{0,782} Pr^{1/3}$
	Gás	4.000-15.000	$Nu = 0,228Re^{0,731} Pr^{1/3}$
	Gás	2.500-15.000	$Nu = 0,248Re^{0,612} Pr^{1/3}$

Digitalizado com CamScanner

Fonte: ÇENGEL, 2012

Pela tabela, são obtidos os coeficientes para o cálculo do coeficiente de convecção, pela expressão de Nusselt (número da equação).

$$m = 0,675$$

$$n = 1/3$$

$$C = 0,102$$

Substituindo os coeficientes acima na expressão (8), vem:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = 0,102 \times (Re^{0,675}) \times (Pr^{1/3}) \quad (8)$$

De (9), isolando o coeficiente de convecção, vem:

$$h = \frac{0,102 \times (Re^{0,675}) \times (Pr^{1/3})}{L_c} \times k \quad (9)$$

Onde  $k$  é a condutividade térmica do material, variável conforme a temperatura, e  $L_c$  é o comprimento característico do corpo que sofre a convecção forçada, neste caso, os conjuntos de células.

Conforme visto anteriormente, os conjuntos de células foram simplificados para paralelepípedos regulares, uma vez que a quantidade de componentes gerava complexidade para simulação. Cada conjunto de 36 células possui as seguintes dimensões: 267 mm de comprimento, 80 mm de largura e 140mm de altura, produzindo um volume de  $2,99E-3 \text{ m}^3$  e uma área superficial de  $0,132 \text{ m}^2$ . Sendo o comprimento característico dado pela divisão do volume do corpo pela sua área superficial, vem:

$$L_c = \frac{V}{A_{sup}} \quad (10)$$

$$L_c = \frac{2,99 \times 10^{-3}}{0,132}$$

$$L_c = 2,259 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Para a condição simulada, onde há sempre dois conjuntos de 36 células, o volume gerador de calor tem valor de  $5,98E-3 \text{ m}^3$  e a área superficial chega a  $0,2798 \text{ m}^2$ . Assim, o comprimento característico do modelo simulado é:

$$L_c = \frac{5,98 \times 10^{-3}}{0,2798}$$

$$L_c = 0,0214 \text{ m}$$

Substituindo este valor na expressão (11), vem:

$$h = \frac{0,102 \times (Re^{0,675}) \times (Pr^{1/3})}{0,02798} \times k \quad (11)$$

E a partir desta expressão, o problema torna-se iterativo, por precisar dos valores de  $Re$ ,  $Pr$  e  $k$  particulares para cada situação simulada, ou seja, variando temperatura e velocidade do ar que entra no container, e pode-se calcular o coeficiente de convecção para os diferentes casos, assumindo apenas um bloco de células como gerador de calor.

Tabela 14 – Valores de Reynolds, Prandtl e coeficiente de convecção para as condições

Propriedades	0 m/s	1 m/s	6,17 m/s	10 m/s
Re (15°C)	0	1,45E+03	9,74E+04	1,45E+04
Re (25°C)	0	1,37E+03	9,17E+03	1,37E+04
Re (35°C)	0	1,29E+06	8,65E+06	1,29E+07
Pr (15°C)	0,73230	0,73171	0,73171	0,73171
Pr (25°C)	0,72960	0,72957	0,72957	0,72957
Pr (35°C)	0,72680	0,72683	0,72683	0,72683
h (15°C)	0,02476	14,5126	54,4018	68,6667
h (25°C)	0,02551	14,3468	51,8029	67,8819
h (35°C)	0,02625	1501,783	5422,601	7105,705

Fonte: Autores

### 5.3 COMPARAÇÃO DA MELHORIA COM O TARGET

Tendo realizado os cálculos preliminares e traçado o caminho, chega-se no momento de conduzir as simulações. Visando a comparação, ao final dos testes computadorizados, entre a mudança proposta e a situação inicial, de referência, observa-se o impacto das melhorias propostas inicialmente.

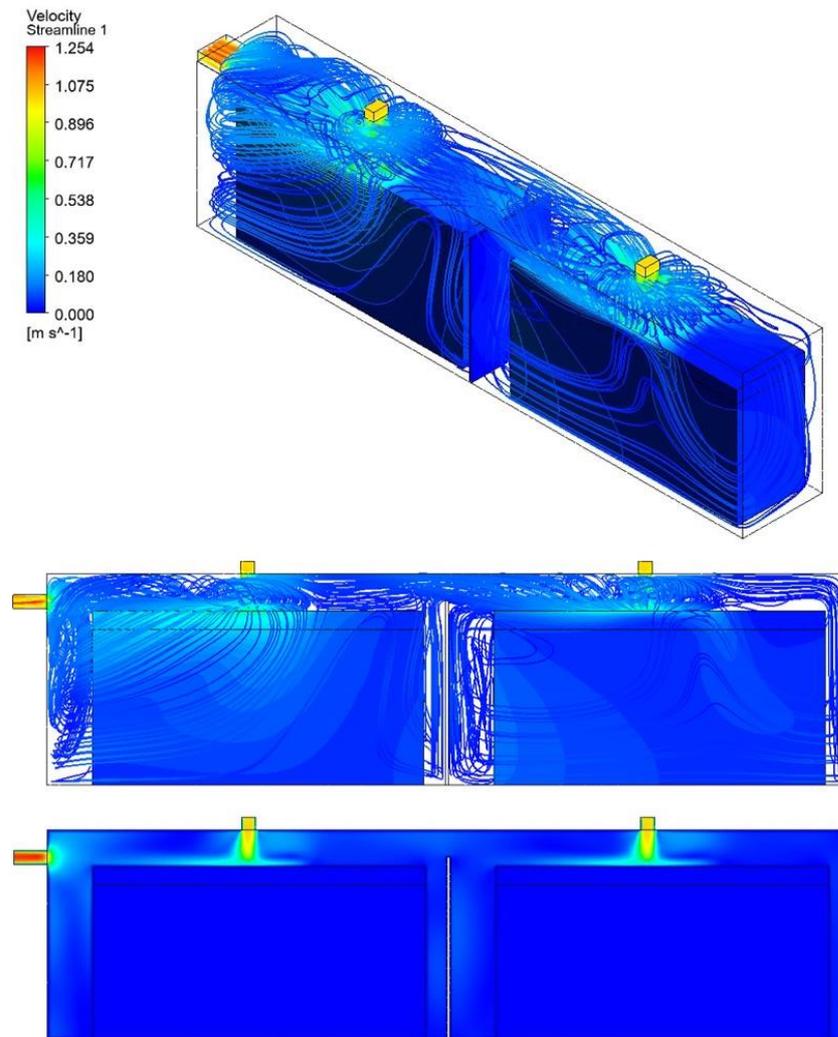
#### 5.4.1 Simulações do layout de referência

Simulando, inicialmente o layout de referência, as condições simuladas foram: mantendo a velocidade do ar de 1 m/s e variando a temperatura do mesmo, partindo de 15°C, para 25°C e depois para 35°C. A velocidade do ar se manteve a 1 m/s pois, segundo os membros da equipe, é o valor máximo que o ar pode chegar dentro do container, visto que não há ventilação necessária.

##### 5.4.1.1 Referência a 15°C e 1 m/s

A seguir, estão mostrados os resultados obtidos pelas simulações do layout de referência com o ar entrando a 1 m/s e 15°C.

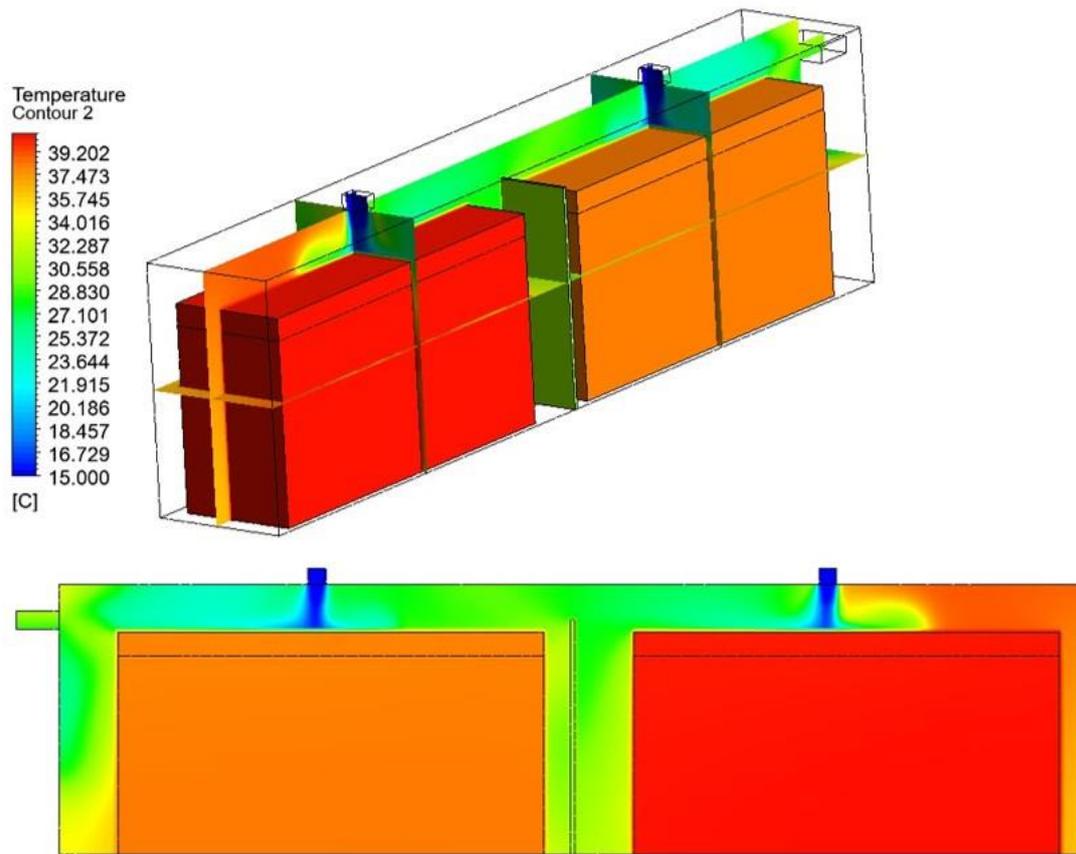
Figura 35 – Velocidade do ar: referência, 15°C e 1 m/s



Fonte: Autores

Conforme mostrado na figura, nota-se que a velocidade máxima do ar que escoar é de 1,254 m/s e que há grandes porções de ar estagnado (0 m/s) em volta dos conjuntos de células. Devido à posição das entradas de ar, a velocidade de insuflação se reduz muito conforme o ar se afasta da face superior dos blocos de células em direção às laterais da seção do container. A velocidade média nessa situação é de 0,065 m/s, ou seja, praticamente estagnação do ar em diversas regiões em torno dos conjuntos de células, o que prejudica as trocas de calor e pode colocar as células em condições desfavoráveis de uso.

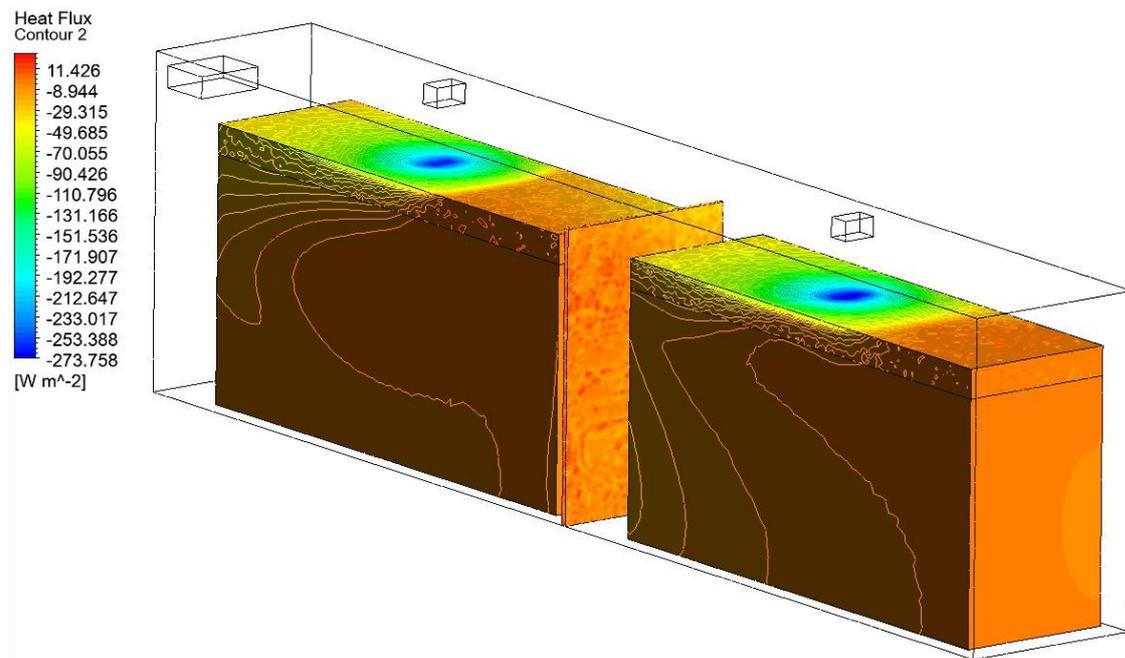
Figura 36 – Temperatura: referência, 15°C e 1 m/s



Fonte: Autores

A figura acima ilustra a diferença de temperaturas tanto nas células, quanto no ar circulado pelo container. Nota-se que o ar entra frio (a 15°C) e logo que entra em contato com os conjuntos de células, sua temperatura aumenta. A temperatura superficial das células se mostra bastante regular e, a pesar de haver distinções nos materiais escolhidos para a região das células e para a região dos conectores, a geração de calor e a baixa troca de calor se somam para que o corpo se comporte como sendo formado por um material só, havendo diferenças térmicas notáveis apenas entre as células mais próximas da saída de ar em relação ao conjunto mais afastado; a baixa velocidade de propagação do ar e as massas de ar estagnado cooperam para tal variação térmica. O ar fica mais estagnado em torno do conjunto longe da saída e, por isso, naquela região, a troca de calor ocorre sempre com a mesma porção de ar, o que aumenta sua temperatura, e diminui sua capacidade de resfriar as células. Nesta situação, a temperatura média da superfície dos conjuntos de células é de 39,3°C e a máxima é de 40,5°C.

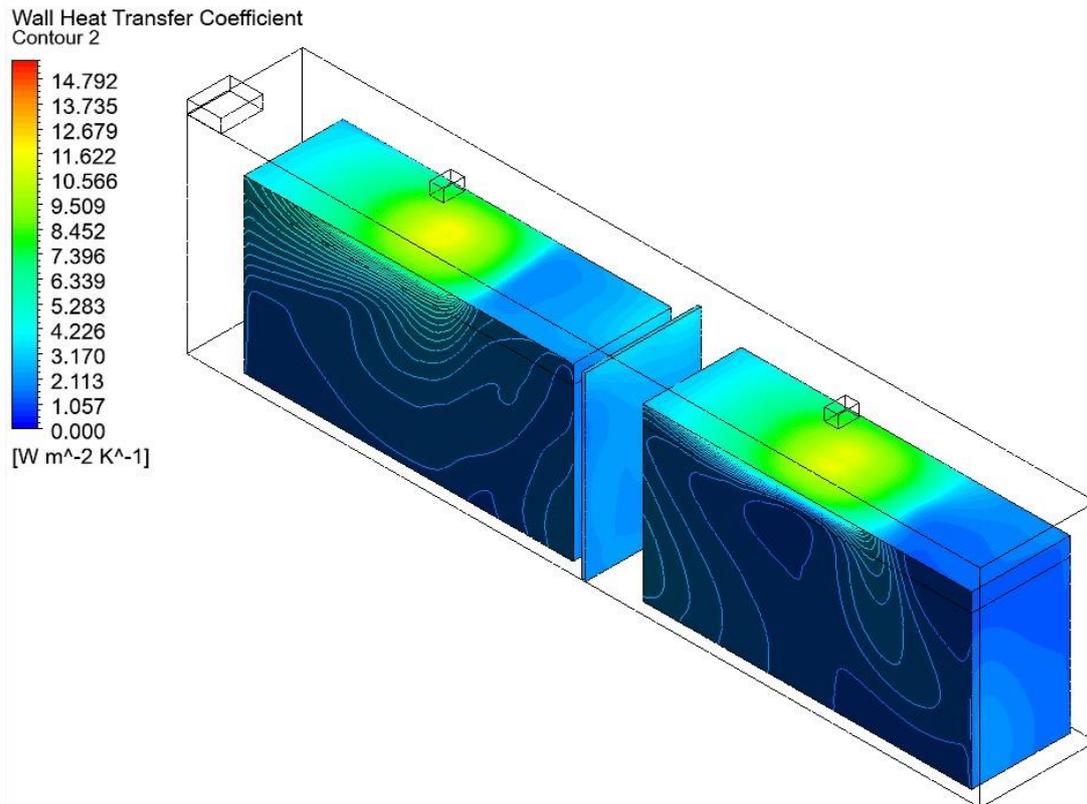
Figura 37 – Fluxo de calor: referência, 15°C e 1 m/s



Fonte: Autores

A figura acima é de extrema relevância para a análise do trabalho, por ilustrar de forma clara, onde ocorre a maior transferência de calor. Analisando rapidamente a legenda, percebe-se que os valores são negativos, isso ocorre devido a interpretação do software em relação à orientação das paredes dos corpos, mas o que interessa de fato são os valores em módulo, e é desta forma que serão analisados em todas as simulações onde há fluxo com sinal negativo. É evidente que a troca de calor não ocorre de forma regular na superfície dos conjuntos de células, se concentrando justamente próximo às entradas de ar, e diminui conforme o ar se afasta desta região, produzindo regiões de baixa transferência de calor que coincidem com as regiões de estagnação do ar e de maiores temperaturas, vistas anteriormente.

Figura 38 – Coeficiente de transferência de calor nas paredes: referência, 15°C



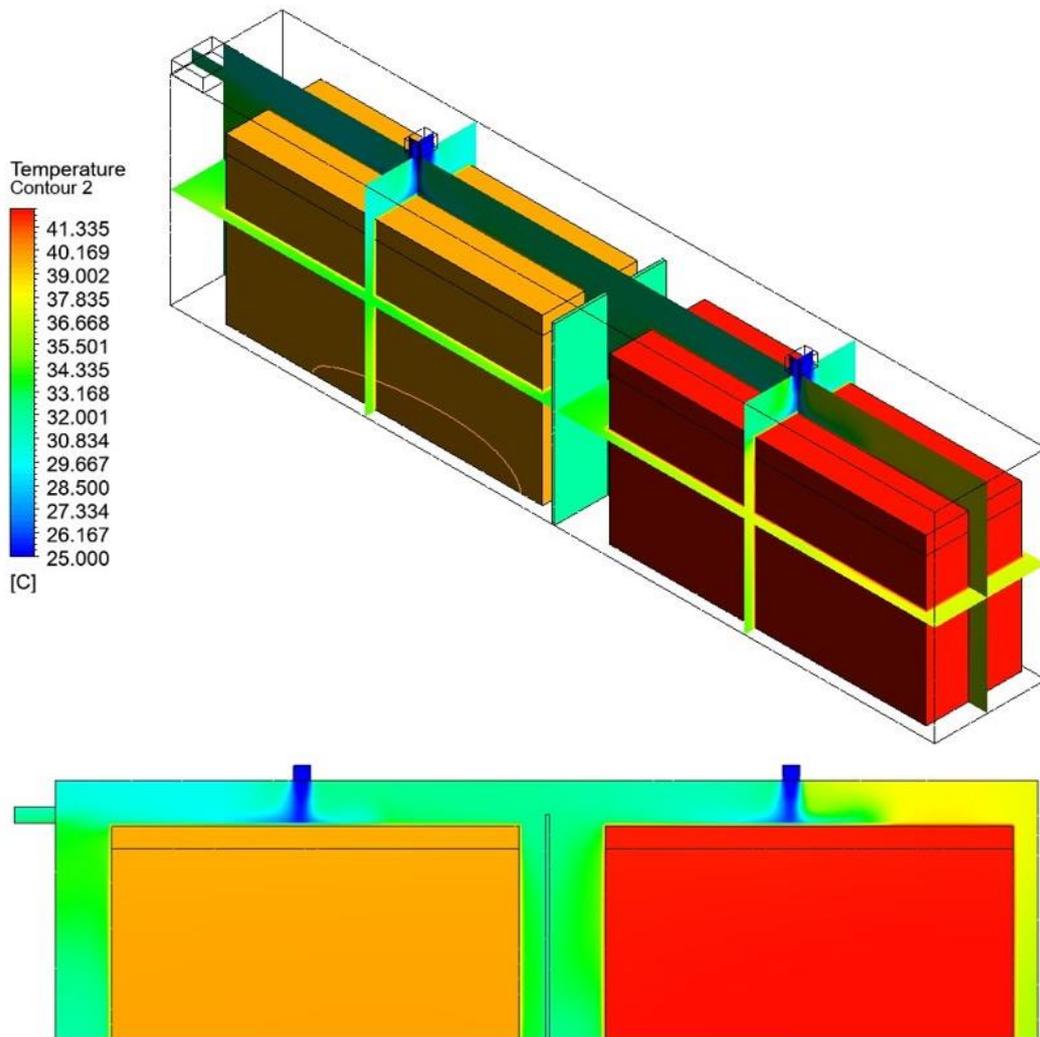
Fonte: Autores

Novamente, um resultado de alta relevância para a análise do projeto, o coeficiente de transferência de calor nas paredes dos conjuntos de células permite avaliar onde ocorre mais trocas de calor entre as células e o ar. Sem atingir valores expressivos, assim como visto na figura do fluxo de calor, o coeficiente de transferência de calor, totalmente alinhado à análise anterior, se concentra diretamente abaixo das entradas de ar e diminui devido à baixa cinética do ar no interno do container, o que contribui para a elevação da temperatura do conjunto de baterias, observado pela equipe atualmente.

#### 5.4.1.2 Referência a 25°C e 1 m/s

Alterando a temperatura de entrada do ar, os resultados se alteram e produzem novas análises. Nota-se um padrão no impacto da configuração e as limitações são evidenciadas.

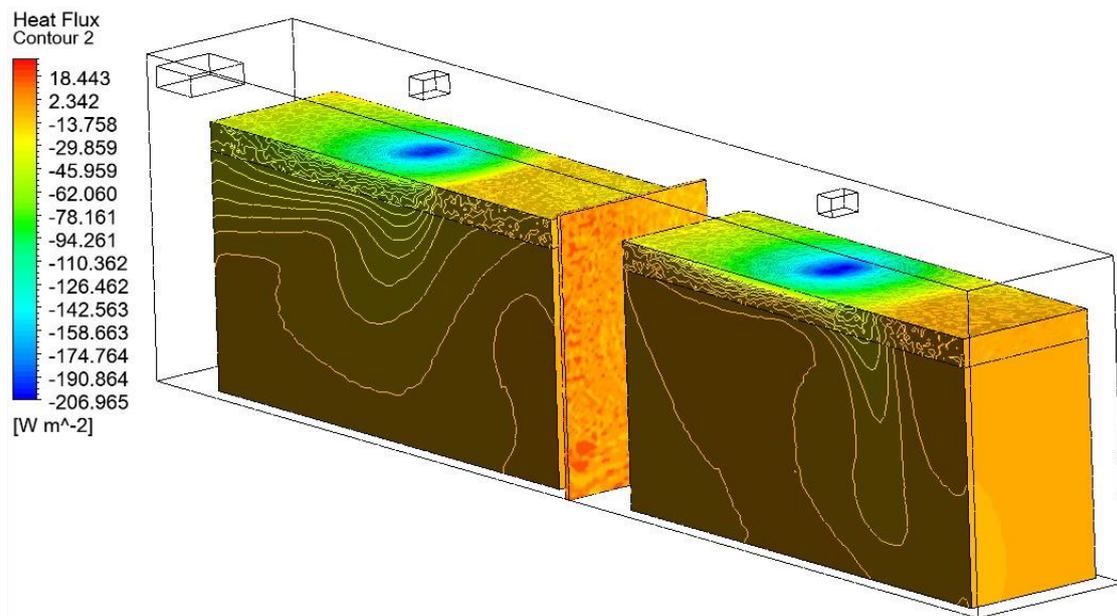
Figura 39 – Temperatura: referência, 25°C e 1 m/s



Fonte: Autores

Com a nova temperatura de entrada, nota-se algumas diferenças. Inicialmente na escala, onde se observa temperaturas superiores às anteriores, justamente pela temperatura de entrada do ar ser maior, e conforme cresce a temperatura do fluido de arrefecimento, menor é a taxa de troca, em respeito à Segunda Lei da Termodinâmica, que trata do equilíbrio térmico entre corpos. Devido ao perfil de escoamento do ar ser muito semelhante ao visto anteriormente, nota-se regiões mais quentes, localizadas nos mesmos locais vistos na primeira simulação e, que conforme aumenta a temperatura de entrada do ar, se tornam mais prejudiciais ao funcionamento das células. Com esta configuração, a temperatura média fica em 40,9°C e a máxima em 42,2°C.

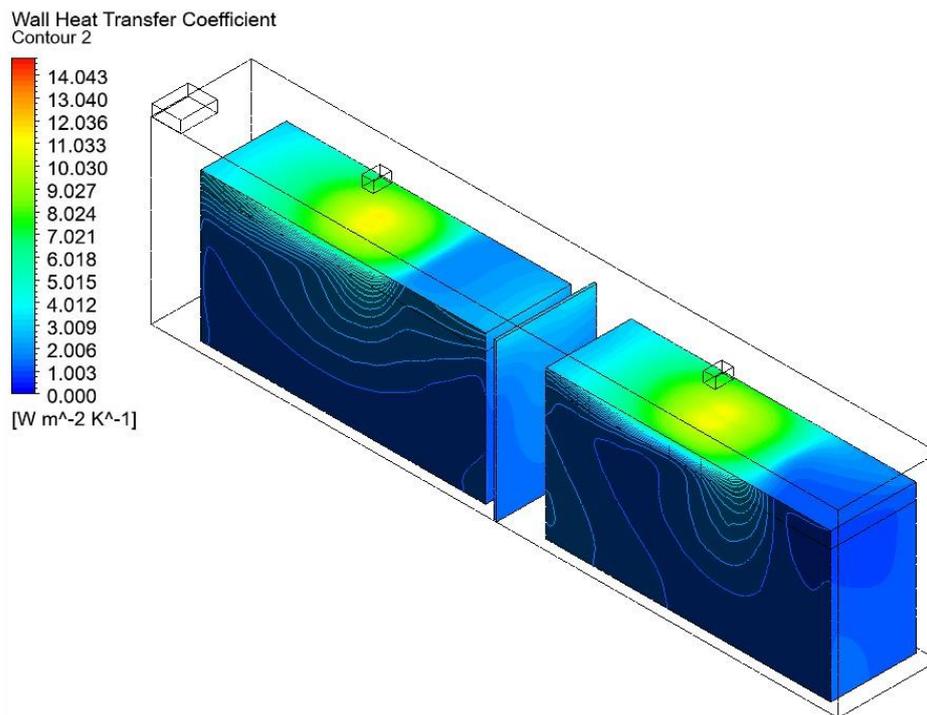
Figura 40 – Fluxo de calor: referência, 25°C e 1 m/s



Fonte: Autores

De forma ainda alinhada ao que se viu na primeira simulação, o fluxo de calor se encontra demasiadamente concentrado em regiões pequenas e não atende de forma adequada às necessidades de transferência térmica do conjunto de baterias, produzindo valores razoáveis apenas em porções pequenas dos conjuntos. A irregularidade da troca de calor produz um efeito extremamente prejudicial às células: a variação de temperatura interna de cada célula e do conjunto. AL-ZAREER (2017) e outros, informam que a temperatura interna das células e entre módulos distintos não deve superar os 5°C, por provocar a perda de até 2% da capacidade do conjunto de baterias. O fluxo de calor mostra que há regiões onde as trocas são mais intensas do que em outras, e isso provoca diferença de temperatura, tanto internamente às células quanto em regiões diferentes dos conjuntos. Visto que a temperatura máxima (vermelho) é de 42,2°C, no conjunto de células da direita (mais à frente), e a temperatura no outro conjunto de células fica em torno de 40°C, conclui-se que, pelo menos na simulação, tal situação não estava ocorrendo, mas talvez com o aumento de corrente se alcance a diferença indesejada.

Figura 41 – Coeficiente de transferência de calor nas paredes: referência, 25°C



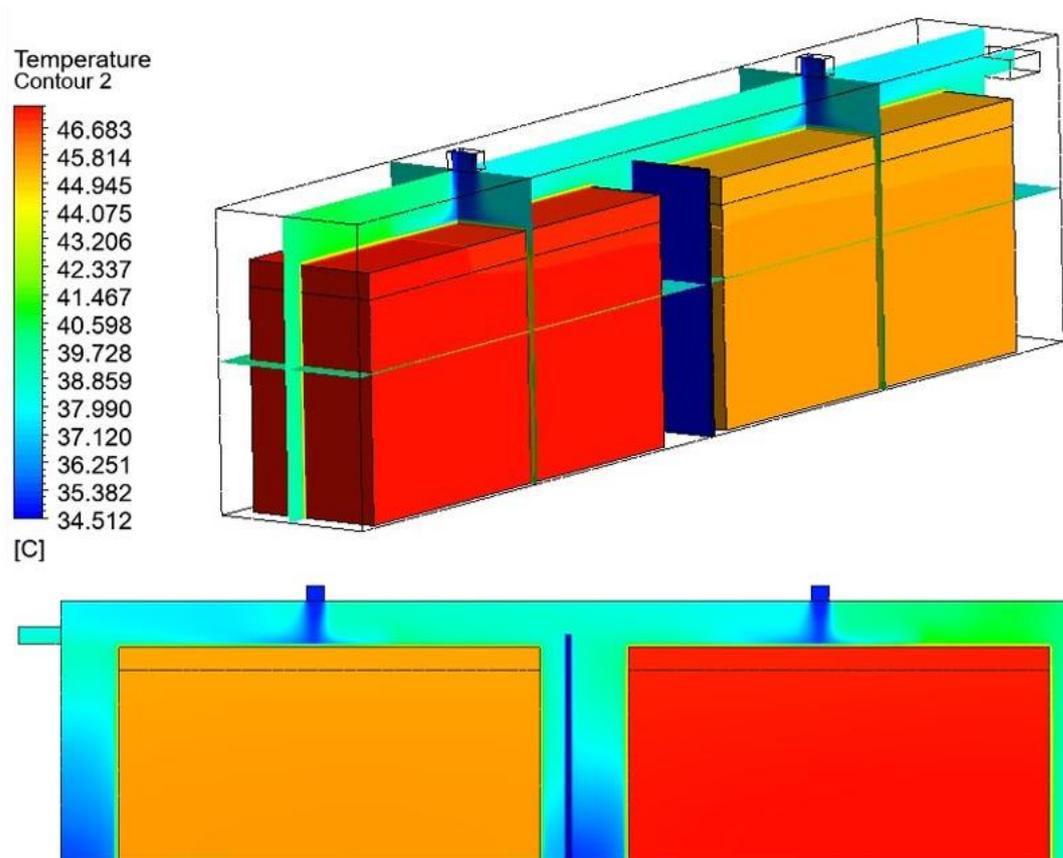
Fonte: Autores

Correspondendo ao visto pelo fluxo de calor, o coeficiente de transferência de calor ainda permanece concentrado e leva a perceber que o fluxo de ar, tanto a velocidade de insuflação quanto a posição das entradas, não é adequado à aplicação por provocar diferenças significativas nos valores de transferência de calor em cada conjunto.

#### 5.4.1.3 Referência a 35°C e 1 m/s

Simulando com a maior temperatura, a máxima do intervalo estipulado, a situação fica crítica, as condições se tornam prejudiciais às células e a necessidade por mudança se torna evidente nessa seção.

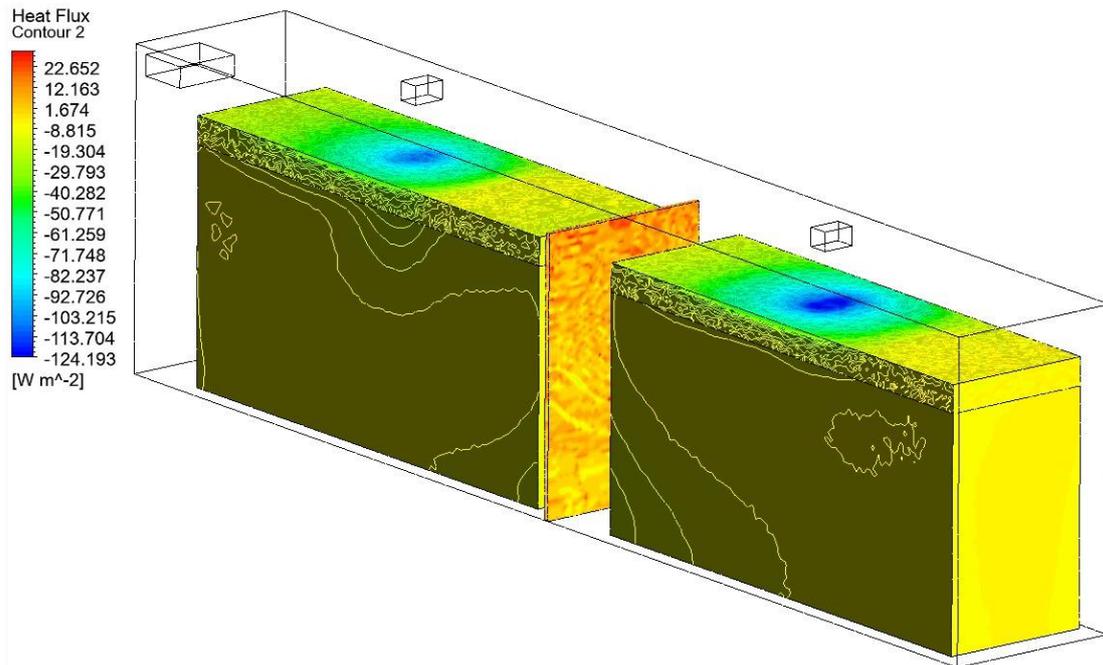
Figura 42 – Temperatura: referência, 35°C e 1 m/s



Fonte: Autores

Com as temperaturas, média e máxima atingindo 46,5°C e 47,3°C, respectivamente, o objetivo de limitar a temperatura em 35°C não foi realizado, superando-a em cerca de 26%. As células se encontram demasiadamente quentes e já mais próximas do limite estipulado pela fabricante, de 60°C. E é relevante ressaltar que a faixa de corrente, portanto a taxa de descarga, não é a mais severa observada durante a volta, o que significa que correntes mais altas provocarão aquecimento superior a este observado, causando situações mais severas às células.

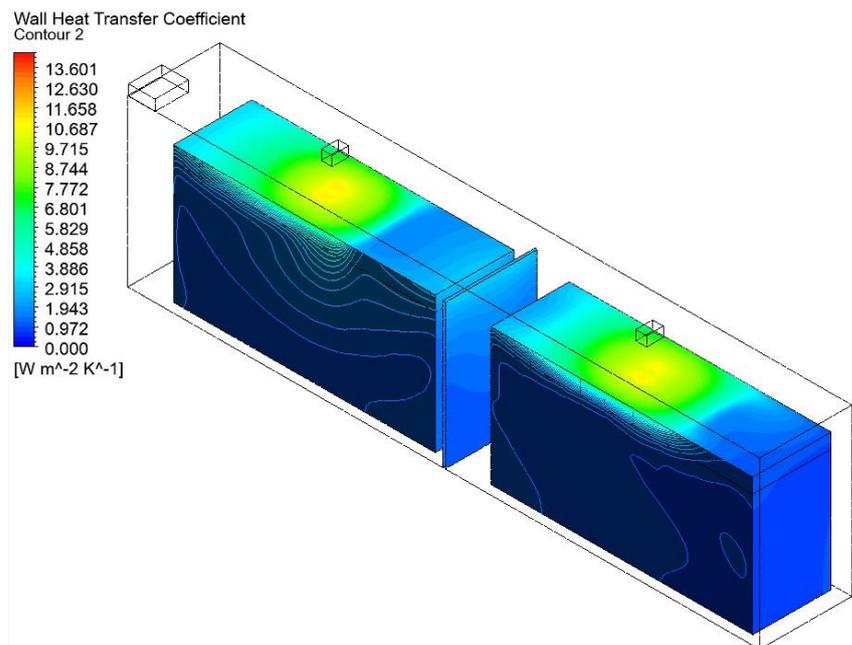
Figura 43 – Fluxo de calor: referência, 35°C e 1 m/s



Fonte: Autores

Mais uma vez, nota-se a indesejada concentração do fluxo de calor na região próxima às entradas de ar. Com a temperatura mais alta, nota-se uma distribuição mais equilibrada do fluxo na superfície dos conjuntos, mas em valores baixos. Vale notar que os maiores valores de fluxo de calor registrados nesta simulação são provenientes da parede separadora feita de alumínio. Na superfície das baterias, o valor fica na região dos  $6 W/m^2$ .

Figura 44 – Coeficiente de transferência de calor nas paredes: referência, 35°C



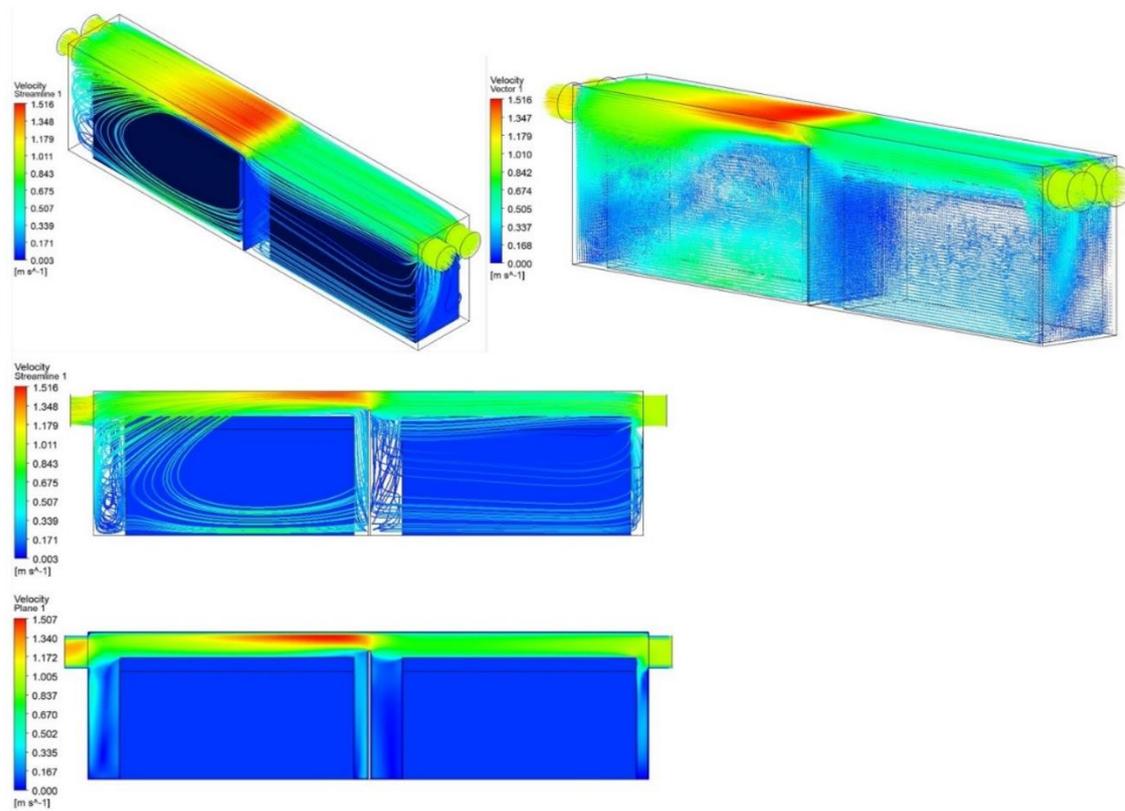
Fonte: Autores

Conforme visto anteriormente, de forma alinhada aos resultados do fluxo de calor, ainda se nota uma distribuição desigual do coeficiente de transferência de calor na superfície das células, e os máximos valores, 11,1 W/m<sup>2</sup>.K, ainda são considerados baixos devido às necessidades de uso.

#### 5.4.2 Simulações do layout alinhado com o ar a 15°C

Para o layout alinhado, as condições de entrada do ar são semelhantes às vistas na referência, com diferença apenas nas velocidades de entrada. Serão feitas simulações onde o ar insuflado tem velocidades de 1 m/s, 6,17 m/s, que é a menor velocidade que as ventoinhas podem acelerar o ar, e 10 m/s, velocidade próxima à máxima.

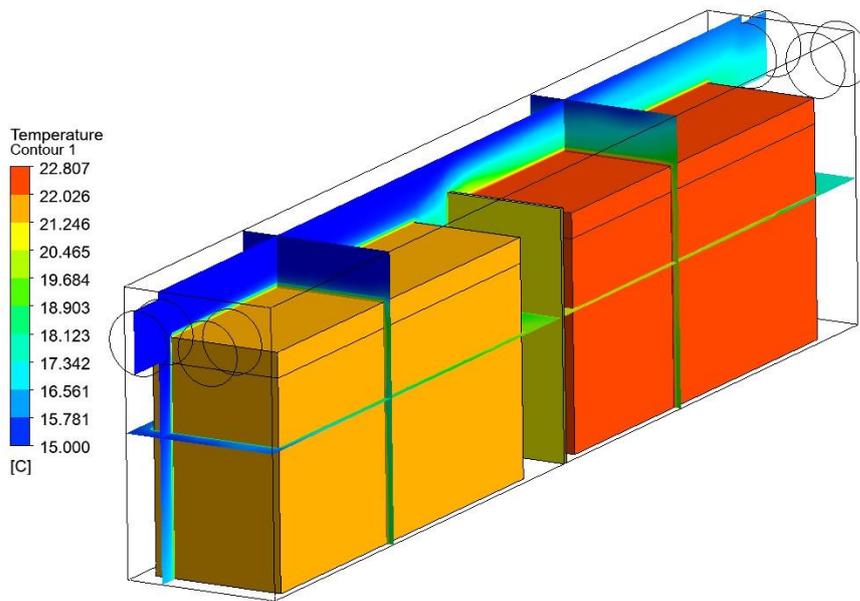
Figura 45 – Velocidade do ar entrando a 1 m/s e 15°C



Fonte: Autores

Em comparação com o layout de referência, nota-se inicialmente, que o ar se movimenta com mais facilidade, e entra em contato com porções maiores dos conjuntos de células com velocidade relevante, em relação à referência onde o ar perdia velocidade devido à forma como entrava no container, e há menos regiões de estagnação do ar, fator importante para o controle térmico. Observa-se que a velocidade máxima nesta configuração de simulação é de 1,516 m/s, e a média é de 0,471 m/s, que são grandes avanços comparados aos números vistos no layout de referência. Vale registrar que a velocidade simulada está muito aquém da capacidade das ventoinhas, portanto, espera-se resultados mais nítidos para os próximos passos das simulações com o layout alinhado.

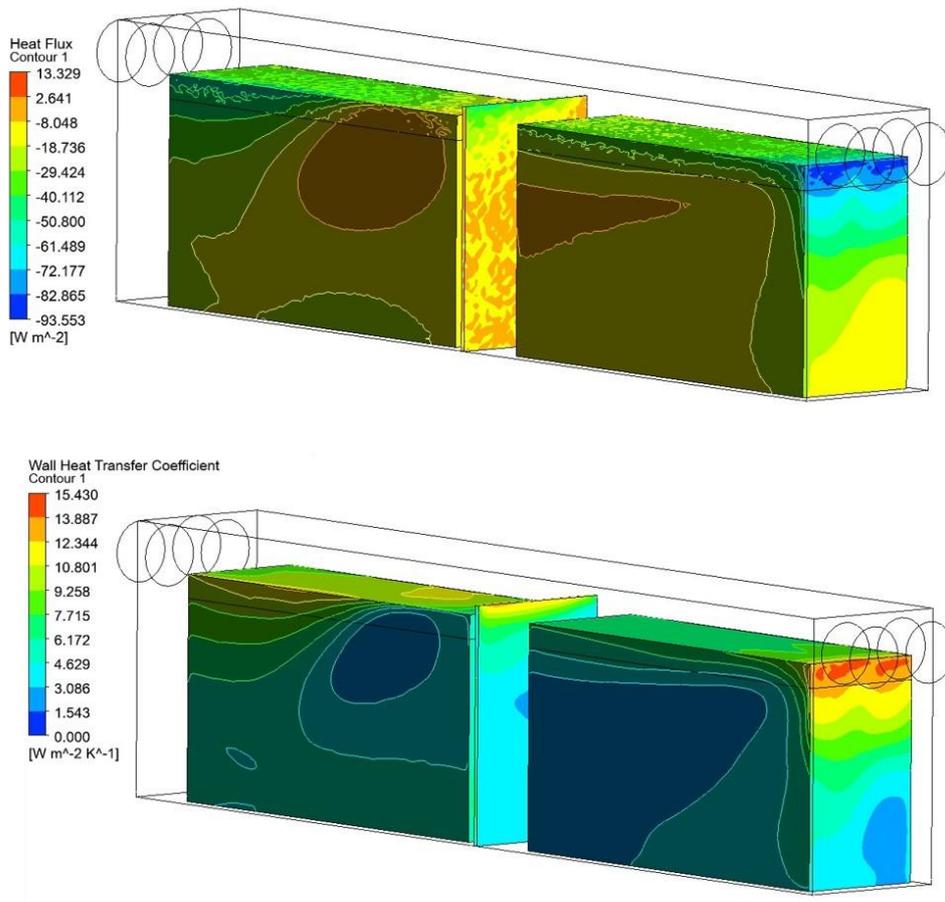
Figura 46 – Temperatura: perfil alinhado a 15°C e 1 m/s



Fonte: Autores

Para a condição simulada, a temperatura máxima observada foi de 22,297°C, ou seja, pouco abaixo da metade do intervalo adequado; a temperatura média, por sua vez, foi de 22,12°C. Mesmo com velocidade de entrada muito baixa, considerando a capacidade das ventoinhas, os efeitos são bastante notáveis e mostram o potencial benefício do layout proposto para o container e para a vida útil das células. Assumindo que o regime de corrente não exija mais geração de calor do que a considerada, esta configuração já seria suficiente para manter as células operando em condições ótimas.

Figura 47 – Fluxo de calor e coeficiente de transferência de calor: alinhado, 15°C



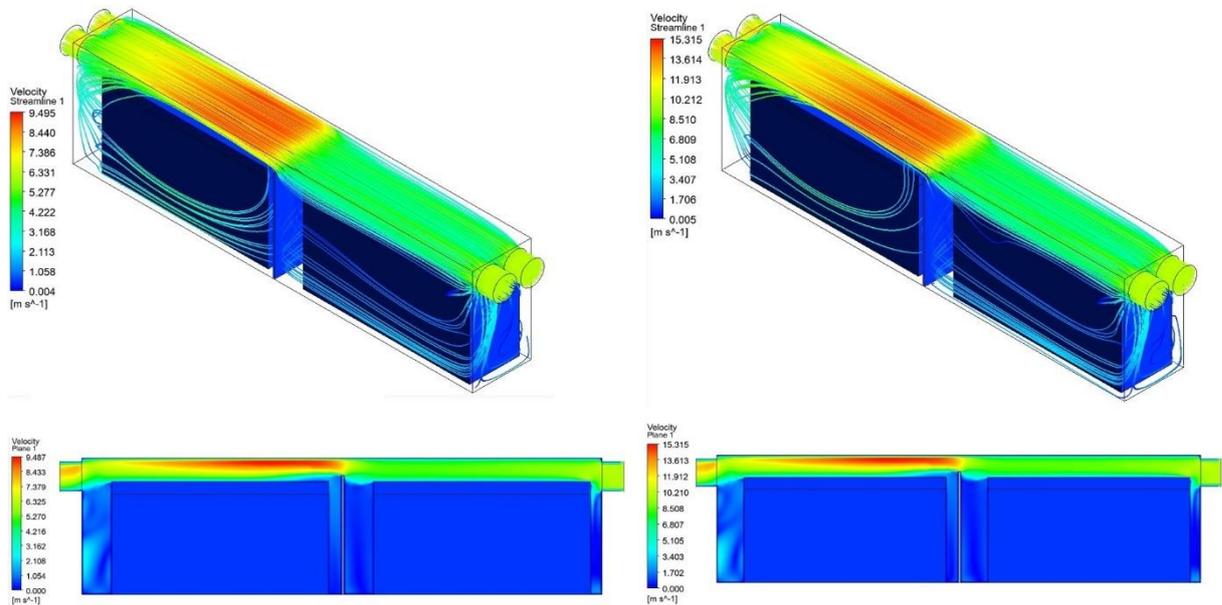
Fonte: Autores

Analisando juntamente, fluxo de calor e coeficiente de transferência de calor na superfície, nota-se que os resultados, assim como no layout de referência, são bastante relacionados. Isso porque o coeficiente de troca de calor será maior em regiões que permitam mais fluxo de calor, ou seja, regiões mais propícias às trocas térmicas. Ainda se pode notar concentrações de fluxo de calor e de coeficiente de transferência na superfície, que ocorrem na região onde o ar entra, mas essas concentrações ocorrem, principalmente, na geometria simplificada dos conectores, e na realidade, o ar infiltraria pela face mais próxima às ventoinhas em direção ao centro do conjunto de células, melhorando a troca de calor naquela região. Com um fluxo de calor médio de  $13,167 \text{ W/m}^2$ , e um coeficiente de transferência de calor médio de  $5,155 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , é evidente que as trocas foram melhoradas e pela figura, nota-se que há distribuição melhor na superfície, e que os mínimos valores não são tão baixos.

### 5.4.3 Simulações do layout alinhado com o ar a 25°C

Continuando as simulações do layout alinhado, ou paralelo, desta vez com o ar entrando a 25°C, e duas diferentes velocidades de entrada, 6,17 e 10 m/s.

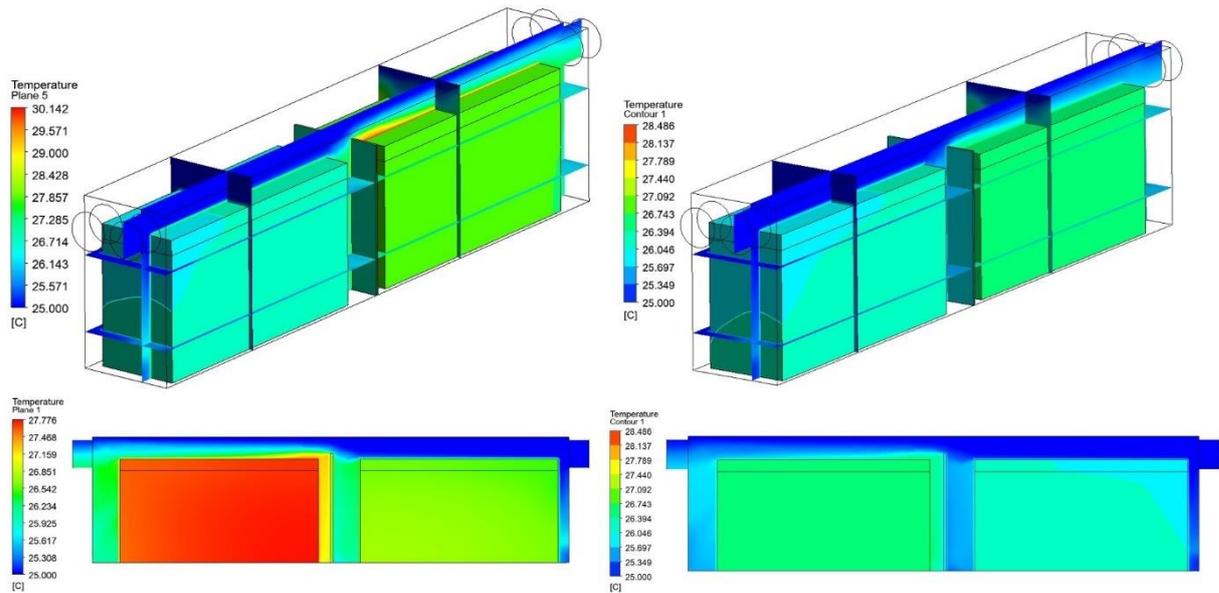
Figura 48 – Velocidades do ar para entrada de 6,17 e 10 m/s, layout alinhado, 25°C



Fonte: Autores

As duas imagens na direita são para a simulação do ar entrando a 10 m/s, enquanto as duas imagens da esquerda, são para o ar entrando a 6,17 m/s. Há diversos aspectos a serem notados comparando as imagens entre si e com a referência. Inicialmente, os valores: para a entrada de 6,17 m/s, a velocidade média do ar foi de 2,96 m/s, a máxima foi de 9,495 m/s; para a entrada de 10 m/s, as velocidades média e máxima ficaram em 4,84 e 15,315 m/s, respectivamente. Há menos regiões de baixa velocidade do ar, que se concentram entre as paredes do container e os conjuntos de células, onde o ar precisa fazer curvas em espaços estreitos. Ainda é válido ressaltar que o ar passa com maior velocidade logo nas regiões que representam os conectores e barramentos e, logo após a parede divisória, que cria um efeito Venturi, a velocidade se torna máxima. Ainda, no perfil alinhado se vê o ar se movimentando, com velocidades relevantes, por todo o contorno dos blocos de células, o que não ocorria tão efetivamente no layout de referência.

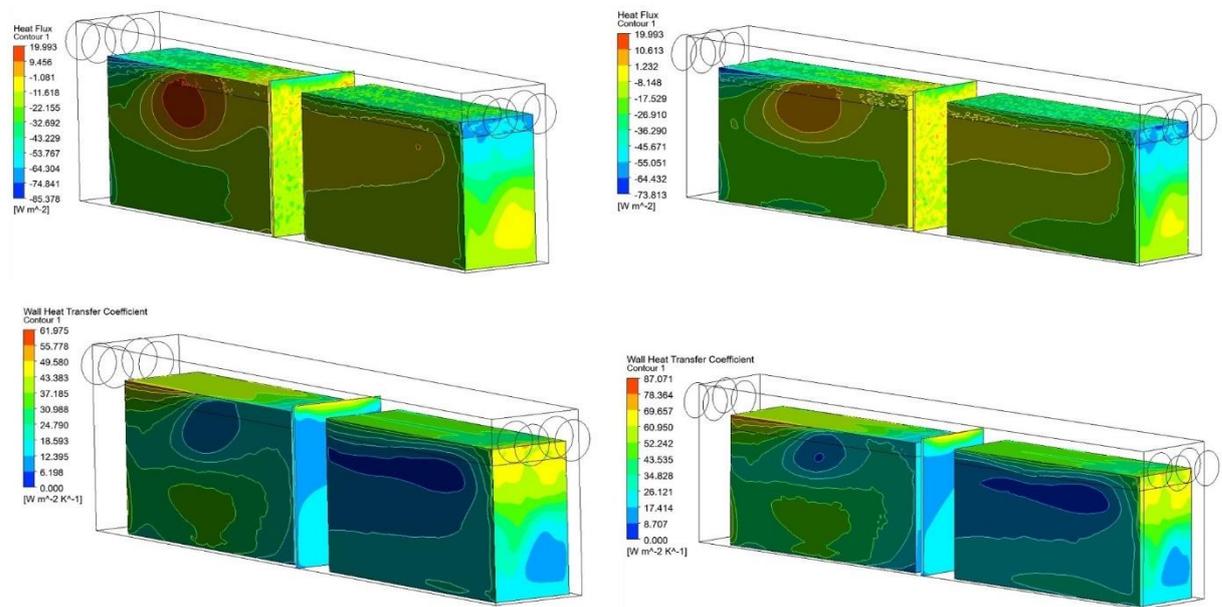
Figura 49 – Temperatura: entrada a 6,17 e 10 m/s, layout alinhado, 25°C



Fonte: Autores

Estando na configuração com o ar a 25°C e as ventoinhas em operação plena, as diferenças entre as soluções de arrefecimento são nítidas e o efeito de um sistema apropriado se mostra claramente benéfico para a operação das células. Assim como na figura anterior, as imagens da esquerda provêm da simulação das ventoinhas operando a 6,17 m/s enquanto as imagens da direita se referem aos resultados do ar entrando a 10 m/s. Uma análise direta das temperaturas mostram que, para a velocidade de 6,17 m/s, a máxima foi de 27,77°C, e a média de 27,16°C; para a velocidade de 10 m/s, foram de 26,54°C e 26,28°C, respectivamente. As imagens mostram que há uma distribuição bastante regular da temperatura sob a superfície, o que indica que as células correm pouco risco de perder capacidade devido à disparidade térmica. Nota-se também, no plano que corta a seção simulada, uma boa representação da camada limite, tal característica é muito bem-vinda pois em nome dela foram feitas diversas simplificações geométricas e sua representação mostra que as simulações foram bem conduzidas.

Figura 50 – Fluxo de calor e coeficiente de transferência de calor, 6,17 e 10 m/s, 25°C



Fonte: Autores

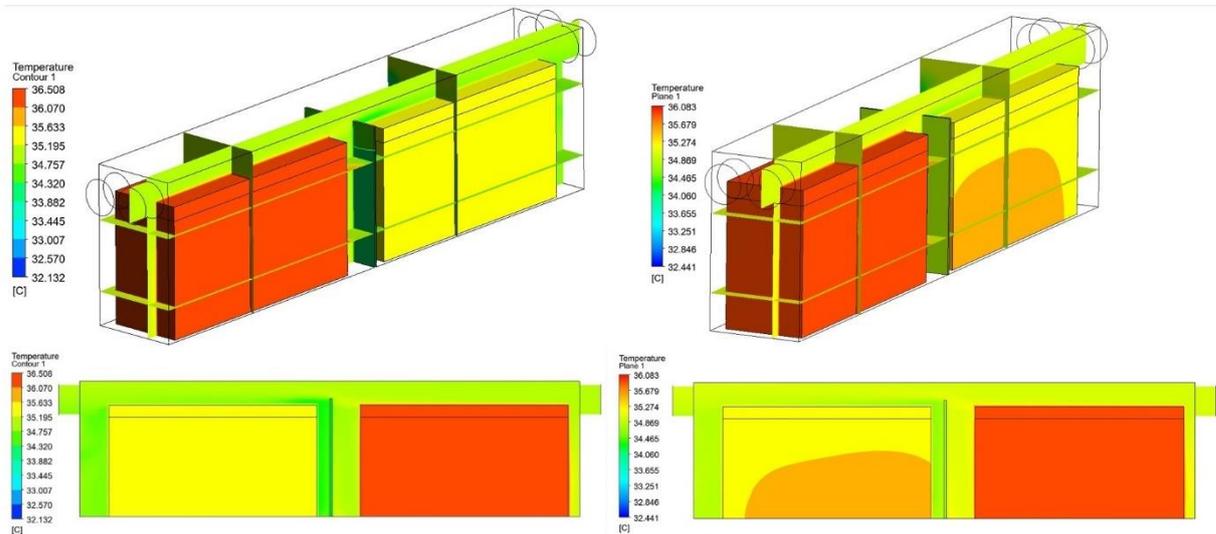
Analisando o fluxo de calor, visto nas duas imagens na parte de cima, a da direita com o ar a 6,17 m/s e a da esquerda com o ar a 10 m/s, percebe-se uma similaridade nas formas dos contornos e ao revisar as imagens da simulação de velocidade, nota-se que as regiões onde há mais fluxo são onde o ar está em contato direto e com maior velocidade, com exceção a uma região na lateral do bloco próximo à saída (ao fundo), que se localiza na lateral, numa região onde há pouco fluxo de ar, e, portanto, maior concentração térmica, o que provoca um fluxo, partindo deste ponto, de calor que se dispersa pelo restante do conjunto. Os resultados de coeficiente de transferência de calor continuam muito alinhados aos resultados obtidos com o fluxo de calor, o que reitera a qualidade das simulações, pois é uma análise que faz todo sentido e era esperada. Ambas as simulações provam que o fluxo se distribui mais regularmente pela superfície dos conjuntos de células.

#### 5.4.4 Simulações do layout alinhado com o ar a 35°C

Em mais uma situação crítica termicamente, desta vez para o perfil alinhado, serão analisados os diferentes desdobramentos que este perfil provoca no comportamento térmico das

células e os impactos para o BTMS que se deseja obter. Novamente, serão colocadas as duas velocidades, 6,17 e 10 m/s para a entrada do ar.

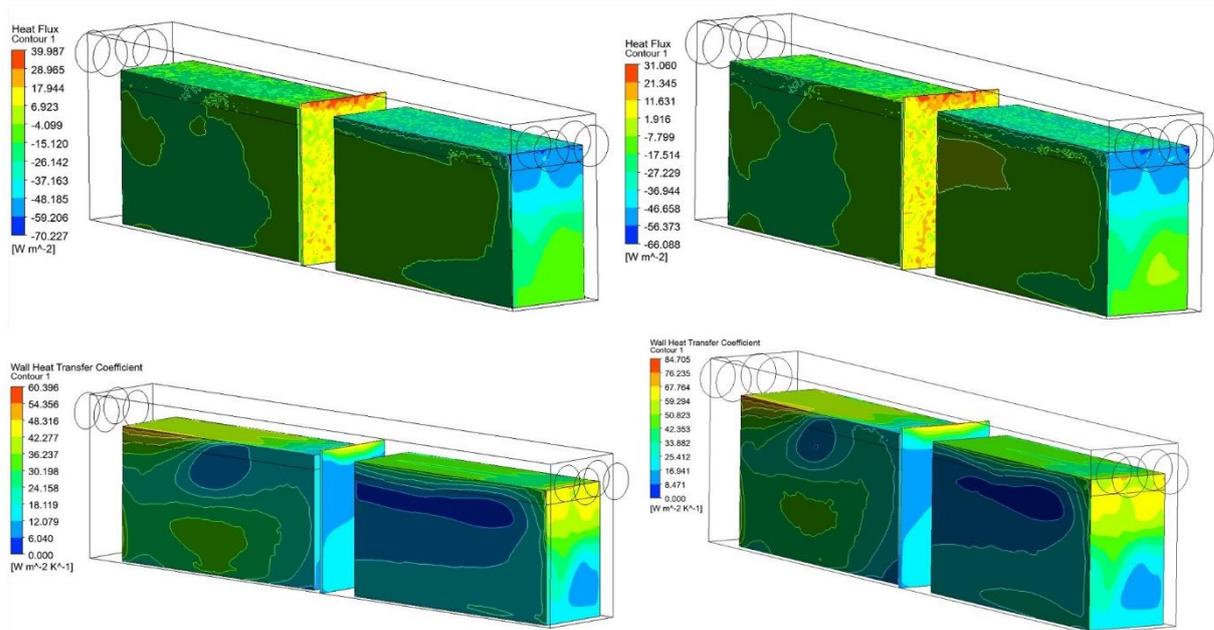
Figura 51 – Temperatura das células para as entradas de 6,17 e 10 m/s, 35°C



Fonte: Autores

Novamente em uma configuração com o ar na máxima temperatura do intervalo recomendado, desta vez com as ventoinhas podendo auxiliar o controle térmico, as simulações produzem resultados positivos se comparados aos vistos nas simulações de referência. Com temperaturas médias de 35,91°C e 35,69°C para as velocidades de 6,17 m/s (esquerda) e 10 m/s (direita), respectivamente, percebe-se que o intervalo térmico foi extrapolado, mas não por muito, não chegando a 1°C; já para a condição de referência, a temperatura média havia sido de 46,48°C. Analisando as temperaturas máximas, os valores obtidos foram de 36,51°C (6,17 m/s) e 36,08°C (10 m/s). A condição de referência provocou 47,34°C. O sistema de ventilação se mostra notavelmente eficaz.

Figura 52 – Fluxo de calor e coeficiente de transferência de calor, alinhado 35°C



Fonte: Autores

Da mesma forma como foi visto nas análises anteriores, há diversas semelhanças entre os resultados de fluxo de calor e coeficiente de transferência de calor, tanto para a mesma simulação, quanto comparando as duas velocidades de entrada. Novamente os maiores valores de fluxo de calor ocorreram na parede entre os conjuntos de baterias, feita de alumínio, o que era esperado ocorrer devido às características do material. Seguindo o padrão visto anteriormente, a ventilação promove distribuição de trocas térmicas de maneira consistente, e observa-se que o coeficiente de transferência de calor diminui drasticamente em regiões onde o ar se move mais lentamente, e se torna maior onde a velocidade do ar é maior.

#### 5.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A fim de encerrar as análises do sistema proposto e comparar os impactos com a situação de referência de maneira mais direta, serão apresentados os dados das simulações realizadas que serão comparados diretamente sempre que forem relevantes.

Tabela 15 – Valores obtidos nas simulações do layout de referência

Variável	Unidade	15°C e 1 m/s	25°C e 1 m/s	35°C e 1 m/s
Temperatura mínima	°C	38.018	39.670	45.568
Temperatura máxima	°C	40.499	42.211	47.335
Temperatura média	°C	39.286	40.972	46.478
Velocidade mínima	m/s	0	0	0
Velocidade máxima	m/s	1.254	1.228	1.217
Velocidade média	m/s	0.065	0.062	0.060
Coef. de troca de calor mínimo	W/m <sup>2</sup> .K	0.827	0.764	0.736
Coef. de troca de calor máximo	W/m <sup>2</sup> .K	11.717	11.425	11.133
Coef. de troca de calor médio	W/m <sup>2</sup> .K	2.504	2.202	1.988
Fluxo calor mínimo	W/m <sup>2</sup>	1.573	0.796	0.983
Fluxo calor máximo	W/m <sup>2</sup>	86.771	69.451	40.174
Fluxo calor médio	W/m <sup>2</sup>	18.010	16.243	10.957

Fonte: Autores

Acima, constam os valores obtidos, diretamente do Ansys, pelas simulações feitas para o layout de referência e a seguir são apresentadas as simulações, incluindo algumas não mencionadas anteriormente, do layout proposto.

Tabela 16 – Valores obtidos nas simulações do layout alinhado

Variável	Unidade	15°C e 1 m/s	25°C e 1 m/s	35°C e 1 m/s	25°C e 6,17 m/s	35°C e 6,17 m/s	25°C e 10 m/s	35°C e 10 m/s
T mín	°C	15.094	28.802	38.061	26.467	35.306	25.922	35.295
T máx	°C	22.297	30.225	40.154	27.763	36.508	26.544	36.083
T méd	°C	22.121	29.530	39.125	27.166	35.910	26.276	35.693
V mín	m/s	0.0033	0.0015	0.0010	0.0039	0.0027	0.0048	0.0084
V máx	m/s	1.516	1.511	1.509	9.495	9.460	15.315	15.177
V méd	m/s	0.471	0.467	0.466	2.961	2.953	4.804	4.772
CTC mín	W/m <sup>2</sup> .K	1.872	1.701	1.621	3.633	3.491	4.571	4.483
CTC máx	W/m <sup>2</sup> .K	15.430	15.045	14.673	54.419	52.960	80.127	77.912
CTC méd	W/m <sup>2</sup> .K	5.155	4.976	4.850	20.270	19.706	29.626	28.525
FC mín	W/m <sup>2</sup>	0.270	0.942	0.957	7.527	1.060	5.684	0.942
FC máx	W/m <sup>2</sup>	47.818	36.233	35.845	42.358	35.228	38.117	34.315
FC méd	W/m <sup>2</sup>	13.167	9.594	8.960	12.437	10.049	11.484	10.347

Fonte: Autores

O uso das tabelas permite uma análise mais direta e simplificada dos resultados, efeitos e limitações de cada layout simulado. Comparações mais diretas são mostradas na sequência.

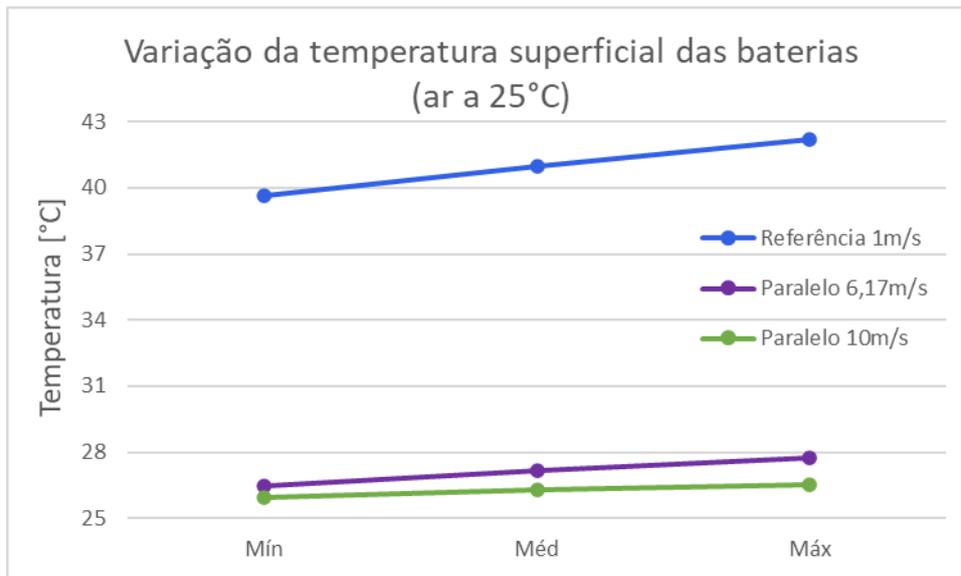
Tabela 17– Temperaturas: referência (1 m/s) e alinhado (6,17 e 10 m/s), ar a 25°C

	Referência	Alinhado 6,17 m/s	Δ%	Referência	Alinhado 10 m/s	Δ%	Alinhado 6,17 m/s	Alinhado 10 m/s	Δ%
Mínima	39.67	26.467	49.88 %	39.67	25.922	53.04%	26.467	25.922	2.10%
Média	40.972	27.166	50.82 %	40.972	26.276	55.93%	27.166	26.276	3.39%
Máxima	42.211	27.763	52.04 %	42.211	26.544	59.02%	27.763	26.544	4.59%

Fonte: Autores

Da forma apresentada na tabela acima, os efeitos do sistema proposto são mais claros. Fica claro que o perfil alinhado pode reduzir a temperatura máxima em mais de 52%, para a velocidade de 6,17 m/s, e em até 59% se a velocidade de entrada for 10 m/s. As diferenças no perfil alinhado, com as velocidades diferentes variam, para a temperatura máxima, na casa dos 4,6%. Vale apontar ainda que, apenas o perfil de referência permitiu temperaturas acima da máxima recomendada, de 35°C; os outros perfis mantiveram a temperatura das células dentro do intervalo estipulado, para o ar a 25°C.

Figura 53 – Comparação dos efeitos dos perfis na temperatura da bateria, 25°C



Fonte: Autores

O Gráfico mostrado permite perceber a magnitude das diferenças entre os layouts simulados. Os três pontos vistos nas linhas são, em ordem crescente, a temperatura mínima, média e máxima para cada uma das condições relacionadas. Nota-se que o impacto do perfil paralelo sobre o perfil de referência é maior entre as temperaturas máximas.

Tabela 18 – Velocidades: referência (1 m/s) e alinhado (6,17 e 10 m/s), ar a 25°C

	Alinhado 6,17 m/s	Referência	$\Delta\%$	Alinhado 10 m/s	Referência	$\Delta\%$	Alinhado 10 m/s	Alinhado 6,17 m/s	$\Delta\%$
Mínima	0.0039	0	-	0.0048	0	-	0.0048	0.0039	22.28%
Média	2.961	0.0619	4686.19%	4.8037	0.0619	7664.94%	4.8037	2.961	62.24%
Máxima	9.495	1.2277	673.41%	15.315	1.2277	1147.49%	15.315	9.4949	61.30%

Fonte: Autores

Nesta tabela, os resultados se mostram tão distintos entre o layout alinhado e a referência, que torna a comparação quase irrelevante, e assim, o mais interessante se torna a análise das duas simulações do perfil proposto, onde nota-se que a velocidade de entrada promove velocidades médias 62% mais baixas que a velocidade de 10 m/s.

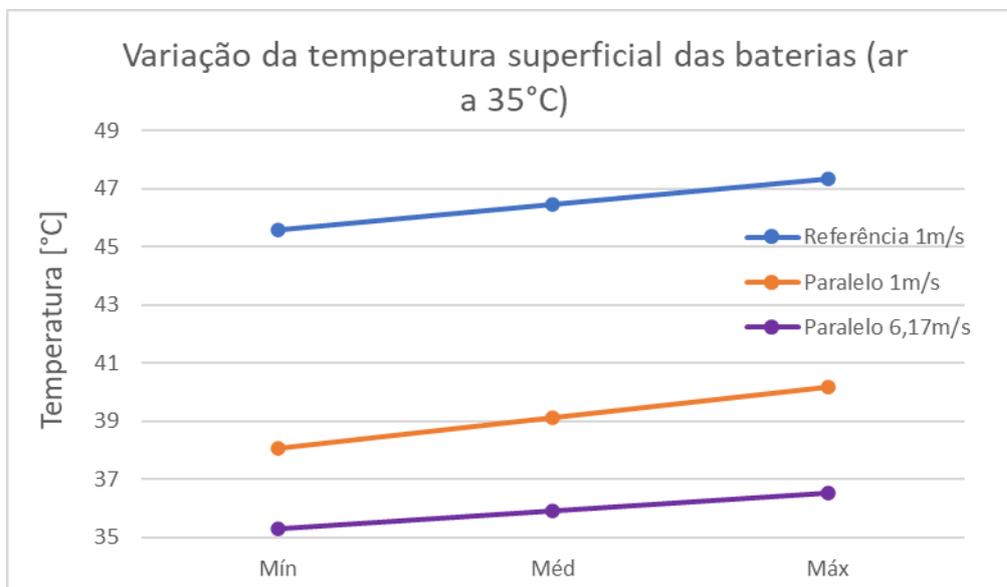
Tabela 19 – Temperaturas: referência (1 m/s) e alinhado (1 e 6,17 m/s), ar a 35°C

	Referência	Alinhado 1 m/s	$\Delta\%$	Referência	Alinhado 6,17 m/s	$\Delta\%$	Alinhado 1 m/s	Alinhado 6,17 m/s	$\Delta\%$
Mínima	45.568	38.061	19.72%	45.568	35.306	29.07%	38.061	35.306	7.80%
Média	46.478	39.125	18.79%	46.478	35.91	29.43%	39.125	35.91	8.95%
Máxima	47.335	40.154	17.88%	47.335	36.508	29.66%	40.154	36.508	9.99%

Fonte: Autores

Para o ar a 35°C e substituindo a entrada do ar de 10 m/s por 1 m/s, no perfil alinhado, as comparações com a referência permitem concluir que, nesta situação crítica, as entradas de ar alinhadas permitem temperaturas máximas 18% e 30%, para 1 e 10 m/s respectivamente, mais baixas que as da referência. As temperaturas médias caem na ordem de 30% para o ar entrando a 6,17 m/s, e as menores temperaturas são observadas para esta velocidade. Nenhum dos perfis foi capaz de manter as temperaturas superficiais das células dentro do intervalo adequado. Isso ocorre devido às propriedades térmicas do ar, que, conforme visto na seleção dos fluidos de troca de calor, são inadequadas em situações críticas; porém o layout alinhado permite quedas de pelo menos 17,9% em relação à referência e quanto menos a temperatura máxima sair do intervalo, melhor para as células.

Figura 54 – Comparação dos efeitos dos perfis na temperatura da bateria, 35°C



Fonte: Autores

Bem como visto anteriormente, o gráfico permite uma visualização direta das diferenças dos efeitos entre os layouts simulados e fica claro, mais uma vez, o quanto o perfil alinhado se mostra superior sob o aspecto de promover trocas térmicas.

## 5.5 CONCLUSÕES

De modo geral, o sistema proposto atende às demandas e condições impostas. Apenas sob condições críticas, como por exemplo, a temperatura do ar estando a 35°C, o sistema não obteve êxito em manter a temperatura dos conjuntos de baterias dentro do intervalo recomendado, porém, a ação do novo perfil de arrefecimento mostra resultados expressivos quando comparados ao sistema de referência, que possui limitações mais visíveis e atuação diminuta. Mesmo quando o sistema demonstrou incapacidade de manter a temperatura abaixo dos 35°C, o excesso de temperatura foi muito menor que o visto no layout de referência, que permitiu ganhos alarmantes.

O grupo recomenda que sejam realizados testes e simulações mais precisos e que possam produzir dados mais úteis à equipe, mas as análises realizadas, apesar de restritas a uma condição de uso menos severo, já demonstram claramente o potencial ganho em eficiência que o sistema de ventilação adequado pode promover.

## 6 CUSTOS

Seguindo o objetivo do trabalho, o qual busca o desenvolvimento de sistemas de controle térmico para o aumento da eficiência de baterias de veículos elétricos, foi mencionado no Business Model Canvas que a fonte de receita é oriunda da venda de projetos.

Foi dividida a análise de custos em duas frentes distintas, a precificação dos componentes do projeto e o ROI (Return Over Investment).

### 6.1 PRECIFICAÇÃO DOS ITENS

Durante a elaboração do projeto, foi definido alguns componentes que compõem o sistema proposto. A partir disso, foi estabelecido a quantidade de cada um deles e foi feito uma pesquisa de preço unitário, chegando nos valores apresentados a seguir.

Figura 55 – Precificação dos Itens

COMPONENTES	TERMISTOR	CHICOTE ELÉTRICO	VENTOINHA	CONECTORES	UNIDADE DE CONTROLE
VALOR	R\$ 15,00	R\$ 65,00	R\$ 170,00	R\$ 6,00	R\$ 70,00
QUANTIDADE	1	1	12	5	1
TOTAL	R\$ 15,00	R\$ 65,00	R\$ 2040,00	R\$ 30,00	R\$ 70,00

Fonte: Autores, 2022

Sendo assim, chega-se ao custo de projeto totalizado em R\$ 2.220,00.

## 6.2 ANÁLISE ECONÔMICA

Conforme mencionado no Canvas do Projeto, é necessário considerar custos fixos e custos variáveis para definir métricas econômicas. Aluguel de software, mão de obra e escritório de engenharia são contemplados como custos fixos, ou seja, gastos essenciais para estrutura e que não variam caso a produção aumente. Enquanto os custos variáveis variam de acordo com o nível de produção tais quais as viagens comerciais, componentes para protótipos e área de testes. Sendo que, para as métricas não foi utilizado nenhum custo variável, apenas os fixos.

Um parâmetro muito utilizado para análise econômica, é o ROI – Retorno sobre Investimento, chegando em uma estimativa de quanto a empresa ganhou com os investimentos feitos. Ou seja, uma métrica para avaliar se um investimento é viável ou não.

$$ROI = \frac{\text{Valor Arrecadado} - \text{Investimento Inicial}}{\text{Investimento Inicial}} \quad (12)$$

Para estudo, foi utilizado o período de um ano e um investimento inicial de R\$ 360 mil distribuídos conforme figura 55 abaixo.

Figura 56 – Investimento Inicial

Investimento Inicial			
Descrição	Valor p/ mês	Qtde. mes	Total ano
Escritório de Engenharia	R\$ 5.000,00	12	R\$ 60.000,00
Contas de Consumo	R\$ 2.000,00	12	R\$ 24.000,00
Aluguel de Softwares	R\$ 3.000,00	12	R\$ 36.000,00
Mão de Obra	R\$ 20.000,00	12	R\$ 240.000,00
<b>Total Custos Fixos Ano</b>			<b>R\$ 360.000,00</b>

Fonte: Autores, 2022

O valor arrecado, conforme mencionado do Canvas de Projeto, vem inteiramente da venda do projeto. Foi estabelecido um valor unitário de R\$ 8 mil e 5 projetos vendidos por mês, totalizando 60 por ano. Assim, o valor arrecado total ano é de R\$ 480 mil.

Com esses parâmetros definidos, é possível estimar o ROI da seguinte maneira:

$$ROI = \frac{480.000,00 - 360.000,00}{360.000,00} = 33\%$$

Após definição do ROI, é possível chegar a um Payback, que possibilita determinar o período em que o investimento monetário volta para o investidor.

$$Payback = \frac{Investimento\ Inicial}{Valor\ Arrecadado}$$

$$Payback = \frac{360.000,00}{480.000,00} = 9\ meses$$

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma a concluir as análises deste estudo, serão colocadas algumas ideias e direcionamentos para grupos futuros que queiram aprofundar as investigações no tema de arrefecimento de baterias. Estudos e pontos que não pudemos ou não nos atentamos durante o desenvolvimento deste trabalho, poderão ser explorados tomando este projeto como base.

Inicialmente, o grupo entende que se faz necessário realizar testes práticos com as células usadas pela equipe, devido à dificuldade de se obter informações acessíveis sobre certos

parâmetros das baterias, a fim de tornar quaisquer dados relevantes imputados nas simulações, os mais fiéis possíveis, enriquecendo os resultados, e tornando as análises mais relacionadas ao modelo real.

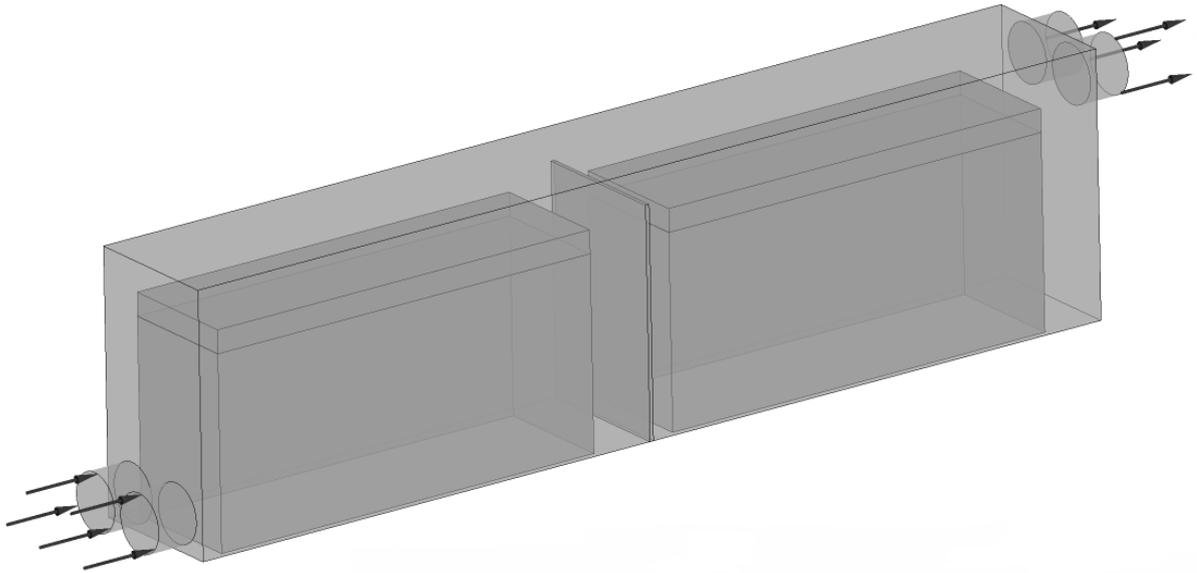
Simulações dinâmicas, como as produzidas pelo AVL Cruise, são essenciais para uma análise mais aprofundada e útil para a equipe. Neste trabalho foram feitas simplificações e considerações que tornariam as simulações do Ansys mais simples e para que certos aspectos relevantes não fossem prejudicados, como a modelagem da camada limite. É evidente que a faixa de corrente adotada não provoca as situações mais críticas do carro, as correntes mais altas são as mais prejudiciais, mas como ficaram de fora da análise, seria de bastante ajuda para a equipe FSAE FEI que se estudasse os efeitos do sistema prop osto durante seções de uso mais extremo. Provavelmente, analisando somente as correntes mais altas (acima de 100A), as ventoinhas se mostrariam ineficazes, e seria necessário combinar a ventilação com alguma outra estratégia.

Nesta linha de raciocínio, o grupo gostaria de ter investigado um sistema que combinasse duas estratégias. A ventilação aliada à aplicação de PCMs, ou de líquidos de imersão, como o óleo mineral. Combinações como resfriamento direto e indireto dividido por seções do conjunto inteiro e até a reforma do layout do contêiner em si seriam estudos ricos e de grande potencial.

Levar em consideração as temperaturas brasileiras seria um ponto extremamente relevante. Propor um sistema novo, mais adaptado ao clima tropical e suas temperaturas pode resultar em resultados brilhantes nas competições brasileiras. É provável que seria importante investigar o emprego de células diferentes, mais apropriadas a tais temperaturas e, portanto, um novo intervalo térmico adequado.

É recomendável ainda que futuros estudos se dirijam a novos perfis de ventilação, que promovam ventilação adequada a mais regiões do interior do container. Este grupo realizou algumas simulações com o perfil conhecido como “perfil em Z”, que produziram resultados interessantes e que podem servir de base e inspiração a temas futuros. São demonstrados alguns resultados a seguir e algumas considerações sobre o perfil em Z.

Figura 57 – Seção simulada do container com o perfil de ventilação em “Z”

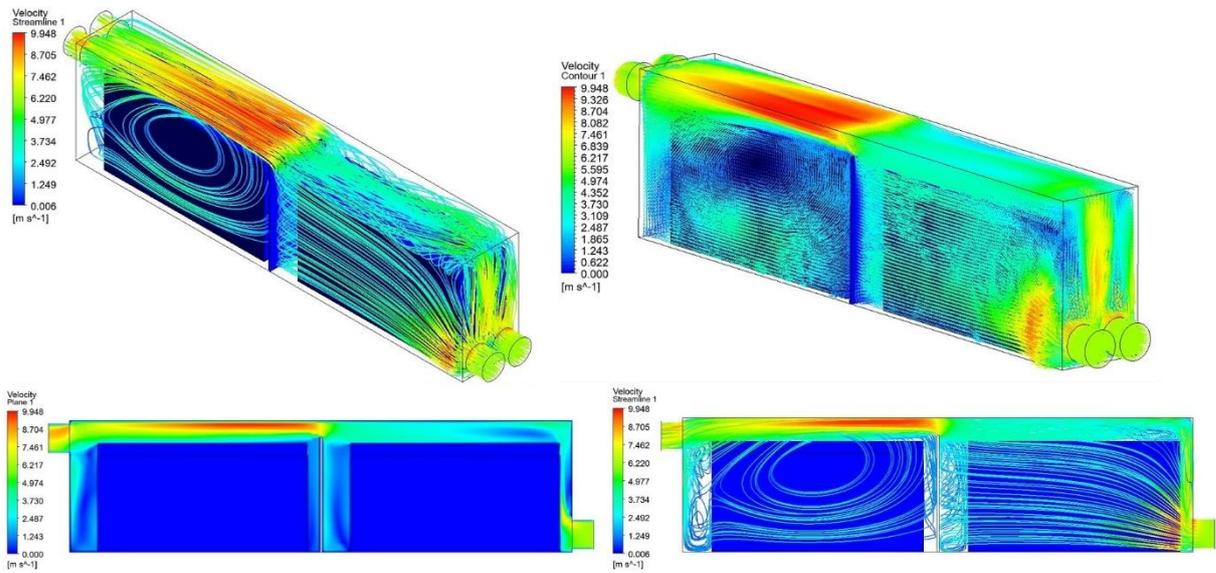


Fonte: Autores

Nota-se que as entradas foram deslocadas para a porção inferior da parede de entrada, enquanto as ventoinhas da saída mantiveram sua posição original. Isso ocorre pois o ar que entra no container geralmente estará mais frio que o ar já em contato com os componentes internos, e pelos princípios da convecção natural, uma porção mais quente de um fluido tende a se movimentar para a parte de cima do ambiente onde se encontra, devido a sua densidade ser menor, enquanto uma porção mais fria, por ter densidade maior, se move para a seção inferior do ambiente ou reservatório. Buscando tomar vantagem do fenômeno, posiciona-se as entradas (ar frio) na parte de baixo e, à medida que o ar esquentava por trocar calor com os componentes do container, se torna mais leve e tende a subir, onde encontra as ventoinhas de saída na parte de cima do container.

Analisando os resultados das simulações feitas, pode-se observar algumas características particulares devidas ao perfil diferenciado e alguns efeitos interessantes.

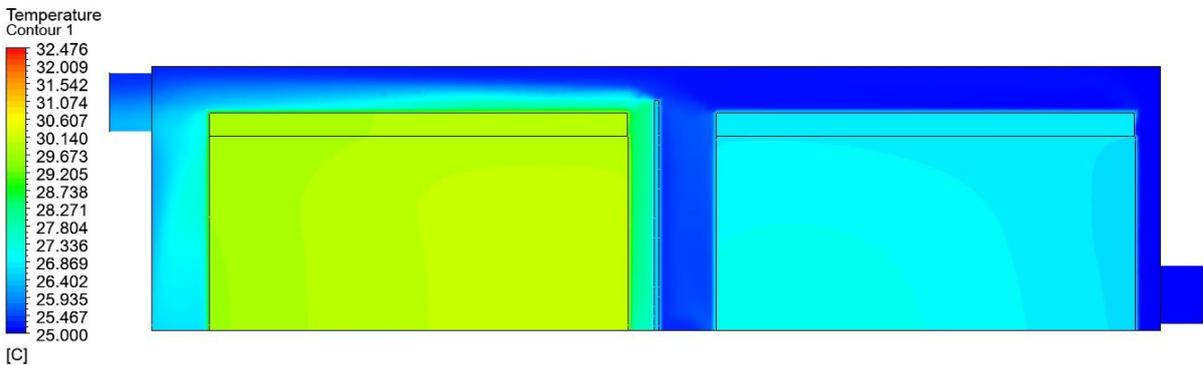
Figura 58 – Velocidade: perfil em “Z” ar a 25°C, entrada a 6,17 m/s



Fonte: Autores

A simulação de velocidades mostra resultados bastante aparentemente positivos para as trocas de calor. Melhor circulação do ar em regiões onde havia estagnação ou velocidades muito baixas, principalmente nas laterais dos conjuntos e nas regiões entre os blocos e a parede divisória central do container. A região de estrangulamento após a parede central se manteve, o que causa aceleração do ar, já na direção da saída. Velocidades média e máxima chegaram aos valores de 3,33 e 9,95 m/s, respectivamente, pouco acima das vistas no layout alinhado.

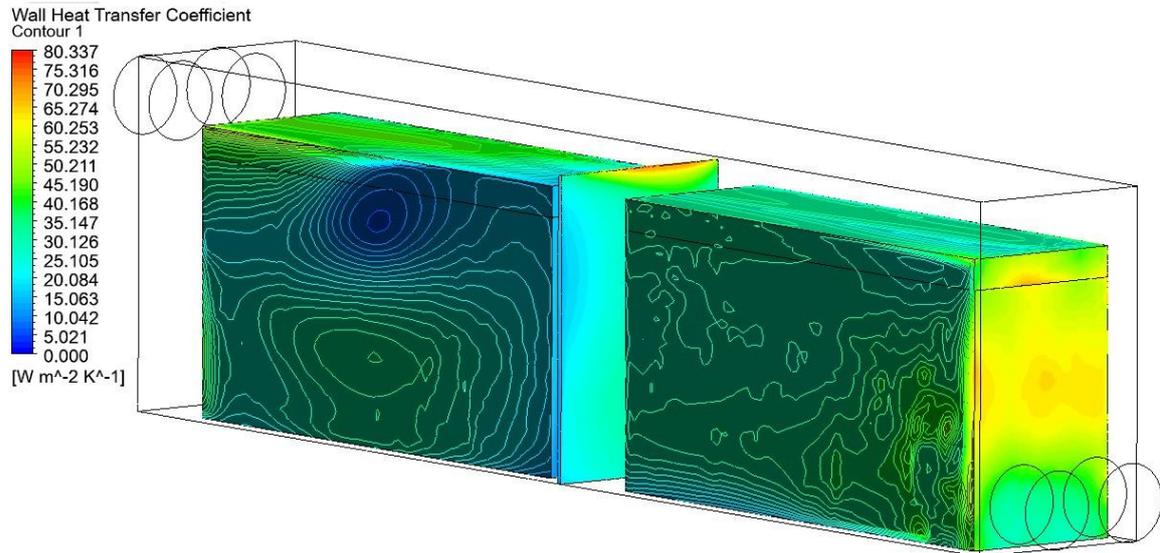
Figura 59 – Temperatura: perfil em “Z” ar a 25°C, entrada a 6,17 m/s



Fonte: Autores

A distribuição de temperatura se mostra bastante regular pela superfície das células e a máxima registrada nessa simulação foi de 30,1°C, enquanto a média ficou em 28,43°C, ambas dentro do intervalo recomendado, porém superiores às observadas no perfil alinhado.

Figura 60 – Coeficiente de troca de calor: perfil “Z”, ar a 25°C, entrada a 6,17 m/s

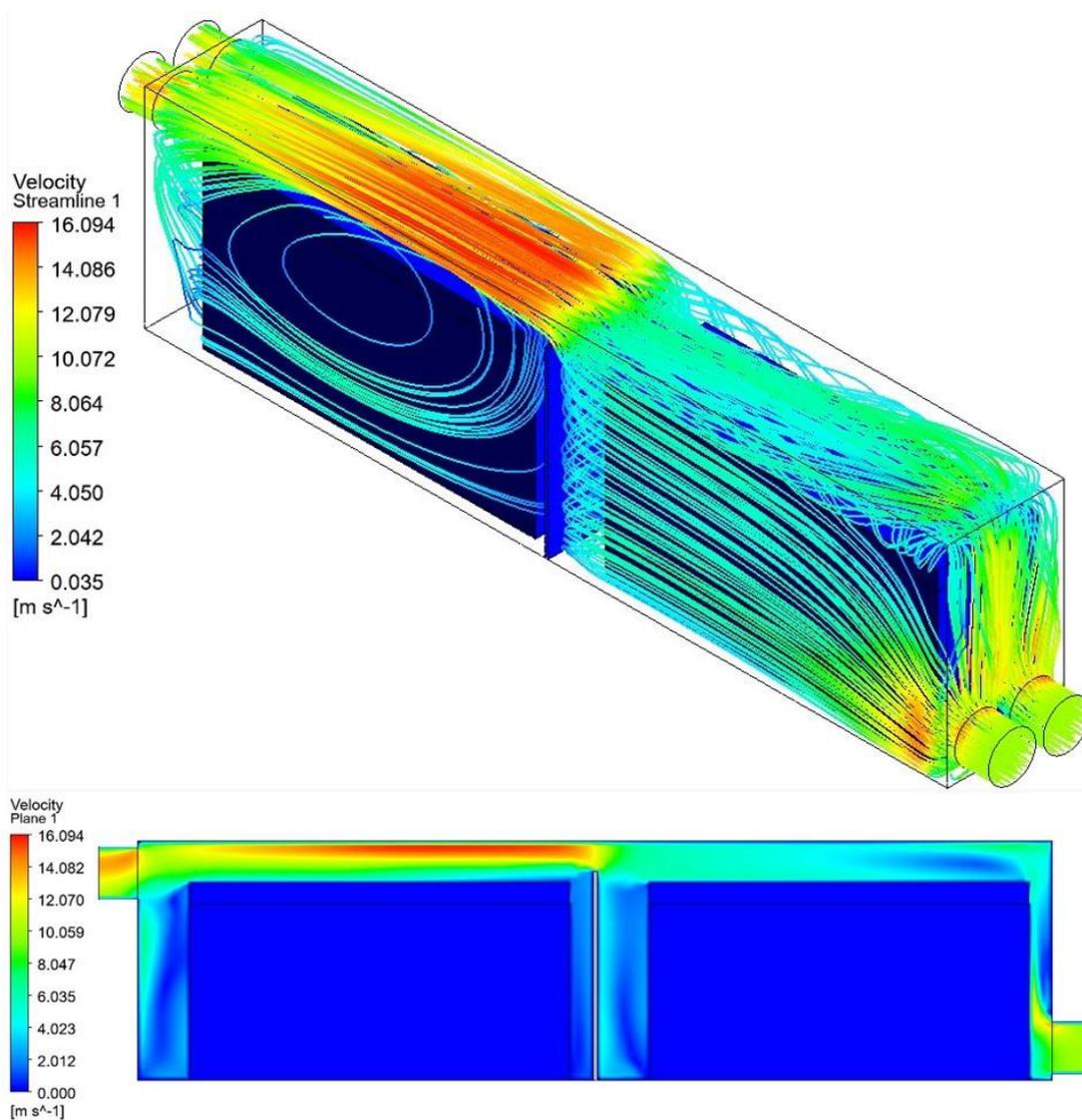


Fonte: Autores

A análise do coeficiente de troca de calor nas paredes dos conjuntos de células demonstra uma distribuição ainda mais uniforme do que a produzida pelo perfil paralelo. Novamente os maiores valores foram observados na parede divisória de alumínio, e os maiores valores nos conjuntos de células se encontram onde o ar faz contato direto e com maior velocidade. Os valores menores se encontram nas regiões de estagnação do ar, observadas nas imagens de velocidade do ar, e em regiões onde o ar não conseguia retirar muito calor, devido à nova configuração, recebem rajadas mais velozes que promovem a troca térmica.

Para a condição de temperatura do ar a 35°C e velocidade de entrada de 10 m/s, os resultados foram semelhantes aos vistos anteriormente. A temperatura do ar, como observado tem imenso impacto nos resultados obtidos, e sendo a temperatura mais alta testada, os três perfis de ventilação demonstraram dificuldade em manter a temperatura superficial das células abaixo dos 35°C. Novamente, isso se dá pela taxa de geração de calor das células que não é desprezível e pelas propriedades do ar não serem as mais adequadas à aplicação. Por isso, seria bastante relevante um estudo sobre a combinação de estratégias de gerenciamento térmico.

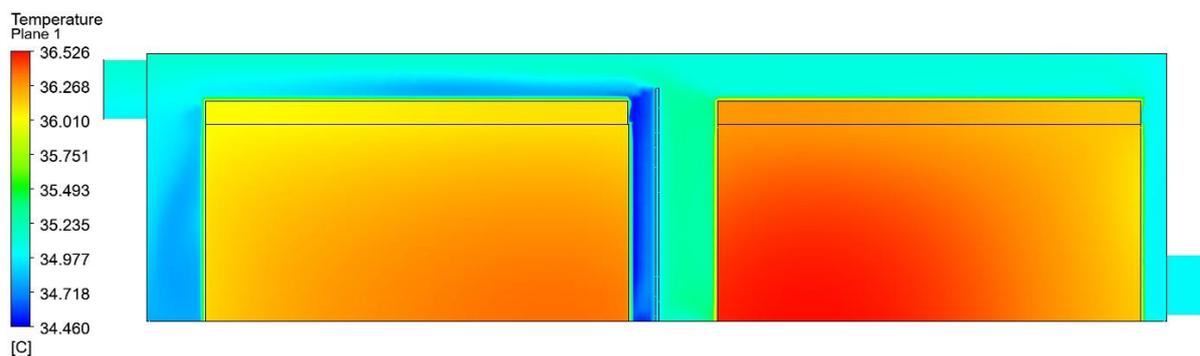
Figura 61 – Velocidade: perfil em “Z” ar a 35°C, entrada a 10 m/s



Fonte: Autores

Pela figura, nota-se as características mencionadas anteriormente particulares do perfil em “Z”, as regiões de maior velocidade, a circulação maior do ar, e os pontos de menor velocidade. Assim como na simulação anterior, o potencial demonstrado pelo perfil se reafirma nos números: 5,41 e 16 m/s são as velocidades média e máxima registradas, respectivamente, sob as condições simuladas, as maiores dentre todas as combinações analisadas pelo grupo.

Figura 62 – Temperatura: perfil em “Z” ar a 35°C, entrada a 10 m/s



Fonte: Autores

Marcando as temperaturas, máxima de 36,56°C, mínima de 36,01°C e média de 36,3°C, pode-se dizer que realmente é um desafio manter a temperatura das células controladas, mesmo sob cargas intermediárias. Mesmo assim, superar a temperatura máxima em apenas 1,5°C, em máxima, pode ser considerado um sucesso, visto que as condições são desfavoráveis.

Tabela 20 – Valores obtidos nas simulações do layout em “Z”

Variável	Unidade	35°C e 1 m/s	25°C e 6,17 m/s	35°C e 6,17 m/s	25°C e 10 m/s	35°C e 10 m/s
T mín	°C	42.493	26.576	36.612	26.016	36.016
T máx	°C	45.245	30.105	37.437	28.564	36.560
T méd	°C	44.051	28.428	37.127	27.355	36.295
V mín	m/s	0.0019	0.0063	0.0076	0.0348	0.0105
V máx	m/s	1.581	9.948	9.915	16.094	16.077
V méd	m/s	0.520	3.331	3.321	5.421	5.409
FC mín	W/m <sup>2</sup>	4.586	6.731	5.315	9.173	37.763
FC máx	W/m <sup>2</sup>	64.691	82.107	60.504	80.291	29.963
FC méd	W/m <sup>2</sup>	21.767	26.836	23.881	26.412	23.802
CTC mín	W/m <sup>2</sup> .K	2.297	4.013	3.176	5.254	4.394
CTC máx	W/m <sup>2</sup> .K	19.970	77.690	75.263	120.369	117.130
CTC méd	W/m <sup>2</sup> .K	6.424	27.424	26.636	39.699	38.548

Fonte: Autores

Tomando os resultados produzidos pelo Ansys, a partir das simulações realizadas, é possível realizar as comparações entre os perfis mencionados, se faz o uso de tabelas com o cálculo da variação percentual entre os valores observados.

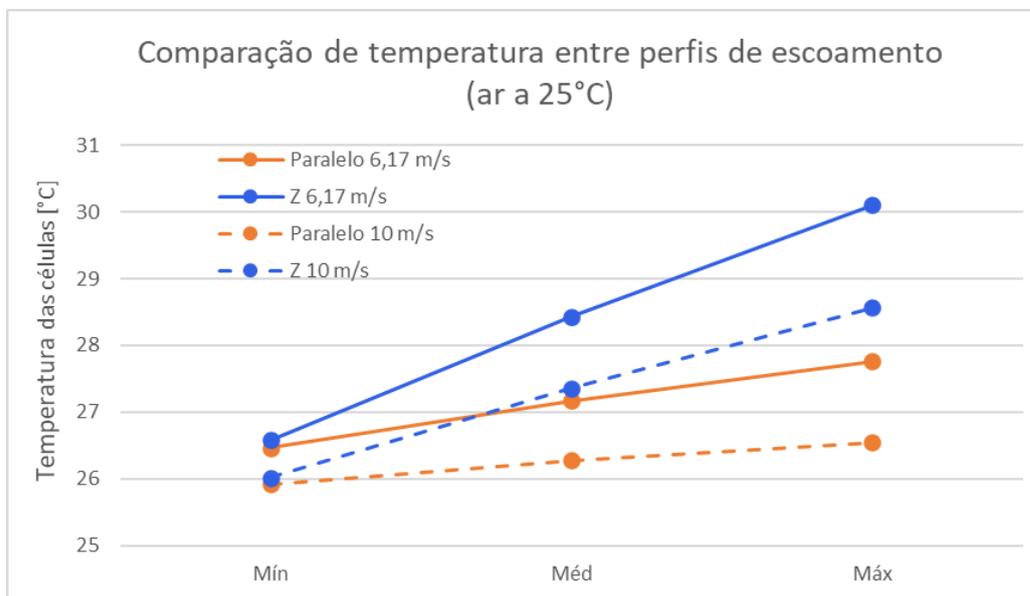
Tabela 21 – Temperaturas: alinhado e em “Z” (6,17 e 10 m/s), ar a 25°C

	Z 6,17 m/s	Alinhado 6,17 m/s	$\Delta\%$	Z 10 m/s	Alinhado 10 m/s	$\Delta\%$
Mínima	26.576	26.467	0.41%	26.016	25.922	0.36%
Média	28.428	27.166	4.65%	27.355	26.276	4.11%
Máxima	30.105	27.763	8.44%	28.564	26.544	7.61%

Fonte: Autores

Pela análise da tabela comparativa, nota-se que o perfil “Z”, em ambas as velocidades de insuflamento, permitiu que os conjuntos de células ficassem mais quentes, em comparação com o perfil alinhado.

Figura 63 – Comparação entre os perfis em “Z” e alinhado, a 25°C



Fonte: Autores

Mesmo com as temperaturas superiores vistas no perfil em “Z”, as velocidades desta nova configuração se mostram maiores. Contraindo a intuição, mesmo com velocidades mais altas, o perfil alinhado se mostra mais eficiente em sua função principal, a troca de calor.

Tabela 22 – Velocidade: alinhado e em “Z” (6,17 e 10 m/s), ar a 25°C

	Z 6,17 m/s	Alinhado 6,17 m/s	$\Delta\%$	Z 10 m/s	Alinhado 10 m/s	$\Delta\%$
Mínima	0.006338	0.0039	62.52%	0.034804	0.004768	629.92%
Média	3.33142	2.96095	12.51%	5.42088	4.80374	12.85%
Máxima	9.94753	9.4949	4.77%	16.0937	15.315	5.08%

Fonte: Autores

## REFERÊNCIAS

- AL-ZAREER, Maan; DINCER, Ibrahim; A. ROSEN, Marc. **Novel thermal management system using boiling cooling for highpowered lithium-ion battery packs for hybrid electric vehicles.** 2017. Review (Tese de Revisão) - University of Ontario Institute of Technology, Ontario, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877531730959X>. Acesso em: 29 maio 2022.
- AN, Z.; SHAH, K.; JIA, L.; MA, Y. **Modeling and analysis of thermal runaway in Li-ion cell.** 2018. Pesquisa - University of California at Merced, Merced, 2019. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111837786X?casa\\_token=-YP6fT8xnGgAAAAA:t960NexeEK38BsVEatBntkhLd9z8PoWj5Nw4jaFzvJYCpm1N3wLiAAJ1JIIJahQk3VDN0Drbdg](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111837786X?casa_token=-YP6fT8xnGgAAAAA:t960NexeEK38BsVEatBntkhLd9z8PoWj5Nw4jaFzvJYCpm1N3wLiAAJ1JIIJahQk3VDN0Drbdg). Acesso em: 30 maio 2022.
- ANALYSIS of a Battery Pack with a Phase Change Material for the Extreme Temperature Conditions of an Electrical Vehicle.** *Energies*, [S. l.], p. 2-3, 21 jan. 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/338736459\\_Analysis\\_of\\_a\\_Battery\\_Pack\\_with\\_a\\_Phase\\_Change\\_Material\\_for\\_the\\_Extreme\\_Temperature\\_Conditions\\_of\\_an\\_Electrical\\_Vehicle](https://www.researchgate.net/publication/338736459_Analysis_of_a_Battery_Pack_with_a_Phase_Change_Material_for_the_Extreme_Temperature_Conditions_of_an_Electrical_Vehicle). Acesso em: 29 maio 2022
- BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos.** 2. ed. rev. São Paulo: Pearson, 2014.
- CALLIGARIS, Lucas Braggião. **Introdução ao dimensionamento de um banco de baterias para um veículo Fórmula SAE elétrico.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - UFPR, Ponta Grossa, 2021. Acesso em: 29 maio 2022
- CARMONA, Andre Giacomini Dias. **ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO ACUMULADOR DE UM VEÍCULO ELÉTRICO DE COMPETIÇÃO.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - UFRS, Porto Alegre, 2021. Acesso em: 29 maio 2022
- ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática.** 4. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2012
- CHEN, Dafen et al. **Comparison of different cooling methods for lithium-ion battery cells.** 2015. Review. National Renewable Energy Laboratory, Golden - Colorado. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115010613?casa\\_token=jI3hsLAv9MgAAAAA:OJHeJA2cd29jx2KRIMSkvVYBkXkt\\_pN4sv8OqAPsaa0Rq\\_Wi9aHeu6IrkW21seFzax4pGOG712I](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115010613?casa_token=jI3hsLAv9MgAAAAA:OJHeJA2cd29jx2KRIMSkvVYBkXkt_pN4sv8OqAPsaa0Rq_Wi9aHeu6IrkW21seFzax4pGOG712I). Acesso em: 29 maio 2022
- CHEN, Fenfang et al. **Air and PCM cooling for battery thermal management considering battery cycle life.** - College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431119370176>. Acesso em: 29 maio 2022
- CHEN, Kai et al. **Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern.** - North China Electric Power University, Beijing, 2018. Disponível em: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ez328.periodicos.capes.gov.br/index.php/buscaor-primo.html>. Acesso em: 29 maio 2022

CHO, G. Y. et al. **TRANSIENT MODELING AND VALIDATION OF LITHIUM-ION BATTERY PACK WITH AIR COOLED THERMAL MANAGEMENT SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES.** - Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12239-014-0083-x>. Acesso em: 29 maio 2022

CHOI, Yong Seok; KANG, Dal Mo. **Prediction of thermal behaviors of an air-cooled lithium-ion battery system for hybrid electric vehicles.** - Battery R&D, LG Chem/Research Park, Daejeon, 2014. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez328.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0378775314011744?via%3DiHub>. Acesso em: 29 maio 2022

DAUD, Zul Hilmi Che et al. **3D electro-thermal modelling and experimental validation of lithium polymer-based batteries for automotive applications.** University Bourgogne Franche Compté, Nevers, 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary-wiley.ez328.periodicos.capes.gov.br/doi/epdf/10.1002/er.3524>. Acesso em: 29 maio 2022

DE OLIVEIRA, Luciana. **Toyota Prius (quarta geração): primeiras impressões:** Carro híbrido mais vendido no mundo já tem quase 30 anos. Nova geração deve chegar ao Brasil em 2016, ainda importada do Japão... Japão, 2 dez. 2015. Disponível em: <https://g1.globo.com/carros/noticia/2015/12/toyota-prius-quarta-geracao-primeiras-impressoes.html>. Acesso em: 18 maio 2022.

DENG, Yuanwang *et al.* **Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium-ion battery system.** 2018. Review (Tese de Revisão) - Hunan University, Hunan, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/>. Acesso em: 29 maio 2022

DENTON, Tom. **Veículos elétricos e híbridos.** São Paulo: Blucher, 2018.

**EV Thermal Management or Cooling EVs. In: EV Thermal Management or Cooling EVs.** [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.lubesngreases.com/electric-vehicles/report/reference/ev-lube-technology/cooling-and-thermal-management/>. Acesso em: 29 maio 2022

FARIA, Rubens Nunes. **Baterias Recarregáveis:** Introdução aos materiais e cálculos. São Paulo: Artliber, 2014.

GARLAND, Max. FedEx Express to get 500 electric vehicles from new GM company BrightDrop. **Commercial appeal**, [S. l.], p. 1, 12 jan. 2021. Disponível em: <https://www.commercialappeal.com/story/money/industries/logistics/2021/01/12/general-motors-brightdrop-fedex-express-electric-vehicles/6637138002/>. Acesso em: 9 fev. 2022.

GO, Eun Min *et al.* **Estimation of heat transfer coefficient of water and ethylene glycol mixture in nanopipe via non-equilibrium coarse-grained molecular dynamics.** - Ulsan National Institute of Science and Technology, Uiwang-si, 2019. Disponível em: <https://pdf.sciencedirectassets.com/>. Acesso em: 29 maio 2022

HEUBNER, Christian et al. **Diffusion-Limited C-Rate: A Fundamental Principle Quantifying the Intrinsic Limits of Li-Ion Batteries.** Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems, Dresden, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/aenm.201902523>. Acesso em: 29 maio 2022

HUGGINS, Robert A. **Energy Storage: Fundamentals, Materials and Applications**. 2. ed. [S. l.]: Springer, 2016

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT, 2017, Jelgava. **INFLUENCE OF BATTERIES WEIGHT ON ELECTRIC AUTOMOBILE PERFORMANCE** [...]. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2017/Papers/N316.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2022.

JARRETT, Anthony; KIM, Il Yong. **Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for termal performance**. Review - Queen's University, Ontario, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775311013279>. Acesso em: 29 maio 2022

KOYAMA, Ryo et al. **Thermophysical properties of trimethylolethane (TME) hydrate as phase change material for cooling lithium-ion battery in electric vehicle**. Review - National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Yokohama, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775319304665>. Acesso em: 29 maio 2022

KUHUDZAI, Remeredzai Joseph. MellowVans' Cool Electric Delivery Vehicles Look To Power The Global Last Mile Delivery Market: Stellenbosch-based MellowVans seeks to help firms across the globe in this space in their quest to unlock operational efficiencies and cost savings by providing them with low cost and emission-free transport. MellowVans develops, manufactures, and leases electric three-wheeler cargo vans that appear to hit the sweet spot of the delivery vehicle market.. **CleanTechnica**, [s. l.], 21 abr. 2020. Disponível em: <https://cleantechnica.com/2020/04/21/mellowvans-cool-electric-delivery-vehicles-look-to-power-the-global-last-mile-delivery-market/>. Acesso em: 15 jan 2022.

LIPO Battery Temperature Range. [S. l.], 12 dez. 2019. Disponível em: <https://www.large.net/news/89u43q6.html>. Acesso em: 9 fev. 2022

MARTINS, Eliseu. **Contabilidade de Custos**. 11. ed. São Paulo: Atlas Ltda., 2018.

MICHELINI, Aldo. **Baterias de Lítio**. São Paulo: STA LTDA, 2020. E-book.

MORAES, FILIPE FARIA DE et al. **Jotun: Otimização de Arrefecimento do Sistema de Propulsão Elétrico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - FEI, São Bernardo do Campo, 2021. Acesso em: 29 maio 2022

NREL INTERNATIONAL BATTERY SEMINAR, 30., 2013, Fort Lauderdale, FL. **Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle Applications** [...]. [S. l.: s. n.]. 30 p. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58145.pdf>. Acesso em: 29 maio 2022

O QUE é gelo seco?. **Nippon Gases: The Gas Professionals**, Espanha, 22 jan. 2018. Disponível em: <https://blogs.nippongases.es/pt/blog/hielo-seco-que-es-y-para-que-se-usa/>. Acesso em: 1 jan 2022.

**PCMS for Residential Building Applications: A Short Review Focused on Disadvantages and Proposals for Future Development**. **Buildings**, [S. l.], p. 1-2, 28 ago. 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/319314865\\_buildings\\_PCMS\\_for\\_Residential\\_Buildings](https://www.researchgate.net/publication/319314865_buildings_PCMS_for_Residential_Buildings)

ding\_Applications\_A\_Short\_Review\_Focused\_on\_Disadvantages\_and\_Proposals\_for\_Future\_Development.

PONTES, José. Tesla Model 3 & Model Y Take #1 & #2 In World Record Month For Electric Vehicle Sales!. **CleanTechnica**, [s. l.], 1 ago. 2021. Disponível em: <https://cleantechnica.com/2021/08/01/plugin-vehicles-have-record-month-globally-in-june-tesla-model-3-model-y-take-1-2/>. Acesso em: 1 set. 2021.

RAMEY, Jay. UPS Vans to Get the Electric Treatment. **Startup company Arrival is building a second microfactory here to fulfill UPS' order of 10,000 electric delivery vans**, Califórnia, 18 mar. 2022. Disponível em: <https://www.autoweek.com/news/green-cars/a35875342/arrival-microfactory-to-build-ups-ev-delivery-vans/>. Acesso em: 20 jan. 2022.

RENAULT. **Trainee Booklet for Zoe: Mechanical Training**. [S. l.: s. n.], 2011. p. 42 - 62.

SABBAH, Rami et al. **Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution**. - Illinois Institute of Technology, Chicago, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775308006150>. Acesso em: 29 maio 2022

SAMIMI, Fereshteh et al. **Thermal management analysis of a Li-ion battery cell using phase change material loaded with carbon fibers**. Shiraz University, Shiraz, 2015. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez328.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0360544215017090?via%3DiHub>. Acesso em: 29 maio 2022

SANYO Denki Products. [S. l.]. Disponível em: <https://products.sanyodenki.com/en/sanace/>. Acesso em: 14 jun. 2022.

SEMINÁRIO DE AVALIAÇÃO DE PESQUISA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 6., 2021, Salvador. **ESTUDO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM CENÁRIO URBANO E RODOVIÁRIO [...]**. Salvador: [s. n.], 2021. Acesso em: 29 maio 2022

SILVA SANTOS, Rafael de Melo. **Estimação do Estado de Carga de Baterias de Lítio-íon em Diferentes Condições de Temperaturas Utilizando Filtros de Kalman**. 2019. Tese de Mestrado. UFPB, João Pessoa. Disponível em: [https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/19499/1/RafaelDeMeloSilvaSantos\\_Dissert.pdf](https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/19499/1/RafaelDeMeloSilvaSantos_Dissert.pdf). Acesso em: 29 maio 2022

SILVA, Cleide. **Disputa pelo mercado de elétricos se acirra**. O Estado de S. Paulo, São Paulo, ano 142, n. 46738, 4 out. 2021. Economia, p. B7.

SILVEIRA, Flávio Gonçalves da. **Gestão térmica em baterias de tração de veículos elétricos**. Tese de Mestrado (Mestrado em Engenharia Automobilística) - Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2020. Acesso em: 29 maio 2022

SONG, Mengxuan et al. **Design of the structure of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system for cooling efficiency improvement**. - Sun Yat-sen

University, Guangzhou, 2018. Disponível em: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ez328.periodicos.capes.gov.br/index.php/buscaador-primo.html>. Acesso em: 29 maio 2022

SRIDHARA, Veerana; SATAPATHY, Lakshmi Narayan. **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based nanofluids: A review**. - New Horizon College of Engineering, Bangalore, 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/51495824\\_Al2O3-based\\_nanofluids\\_a\\_review](https://www.researchgate.net/publication/51495824_Al2O3-based_nanofluids_a_review). Acesso em: 29 maio 2022.

SUN, Hongguang; DIXON, Regan. **Development of cooling strategy for an air-cooled lithium-ion battery pack**. 2014. Canadian Regional Engineering Centre, GM of Canada Ltd, Oshawa. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531401372X>. Acesso em: 29 maio 2022.

THE LIPO Battery Characteristics And Applications. [S. l.], 14 jul. 2016. Disponível em: <https://www.genstattu.com/blog/the-lipo-battery-characteristics-and-applications>. Acesso em: 9 fev. 2022.

TINGWALL, Eric. **Explained: Battery Thermal Management in Formula E Race Cars**. [S. l.], 2 jan. 2017. Disponível em: <https://www.caranddriver.com/news/a15344587/explained-battery-thermal-management-in-formula-e-race-cars/>. Acesso em: 29 maio 2022.

UNDERSTANDING Hybrid and EV Cooling Systems. [S. l.], 20 maio 2019. Disponível em: <https://trade.mechanic.com.au/news/understanding-hybrid-and-ev-cooling-systems>. Acesso em: 9 fev. 2022.

VARELA, Hamilton; HUGUENIN, Fritz; MALTA, Marcos; M. TORRESI, Roberto. **MATERIAIS PARA CÁTODOS DE BATERIAS SECUNDÁRIAS DE LÍTIU**. 2001. Revisão - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Disponível em: [http://old.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422002000200017&script=sci\\_arttext](http://old.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422002000200017&script=sci_arttext). Acesso em: 30 maio 2022.

Venting for EV Battery Packs. **SAE & Tech Briefs E-Book**, SAE Publications, p. 8-11, 2021. Disponível em: <https://www.techbriefsmediagroup.com/magazines/ntb>. Acesso em: 29 maio 2022.

WEIXIONG, Wu *et al.* **A critical review of battery thermal performance and liquid-based battery thermal management**. 2019. 20 p. Review - School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangdong, 2018. Disponível em: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ez328.periodicos.capes.gov.br/index.php/buscaador-primo.html>. Acesso em: 29 maio 2022.

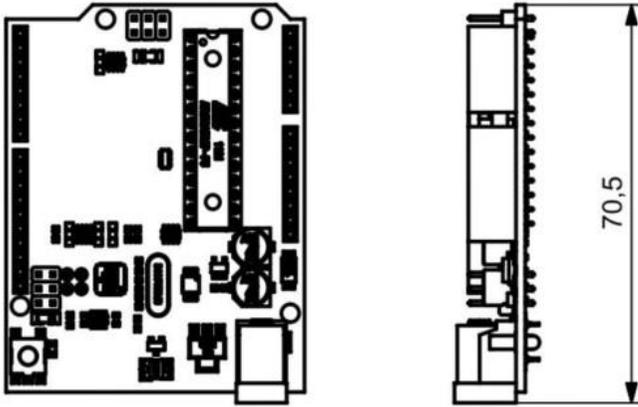
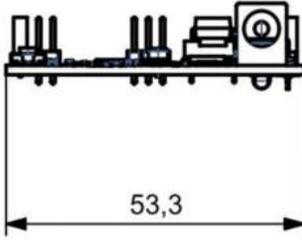
WOLLINGER, Leonardo. **Baterias de Lítio-Íon: Um guia completo**. [S. l.], 23 jan. 2020. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/baterias-de-litio-ion-um-guia-completo/>. Acesso em: 9 fev. 2022.

WORWOOD, D. **Thermal analysis of a lithium-ion pouch cell under aggressive automotive duty cycles with minimal cooling**. 2016. Review. University of Warwick, Coventry. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8121962>. Acesso em: 29 maio 2022.

YANG, Xiao-Hu; TAN, Si-Cong; LIU, Jing. **Thermal management of Li-ion battery with liquid metal**. Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2016. Disponível em: <https://linkinghub-elsevier-com.ez328.periodicos.capes.gov.br/retrieve/pii/S0196890416301923>. Acesso em: 29 maio 2022.

YOUNG E FREEDMAN, Hugh D. e Roger A. **Física II: Termodinâmica e Ondas**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2013.

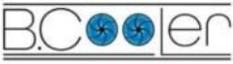
## **APÊNDICE 1 - DIMENSIONAMENTO CONTROLADOR**

1	2	3	4	5	6
A					A
B					B
C					C
D					D
1	2	3	4	5	6

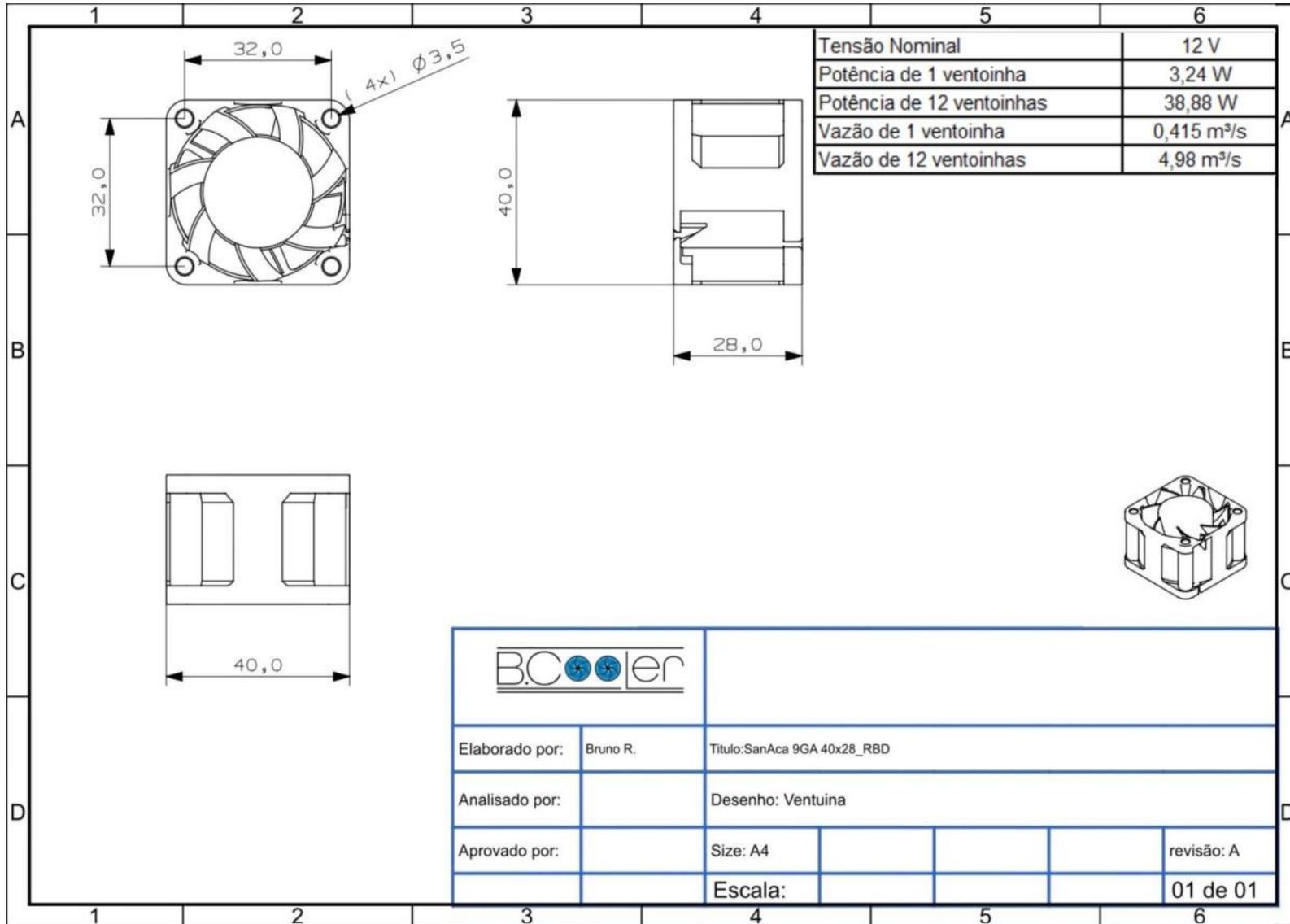
  

	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Microcontrolador</td> <td>ATmega328</td> </tr> <tr> <td>Tensão de funcionamento</td> <td>5V</td> </tr> <tr> <td>Tensão de entrada(recomendado)</td> <td>7 - 12 V</td> </tr> <tr> <td>Tensão de entrada (limites)</td> <td>6 - 20 V</td> </tr> <tr> <td>Digital I/O</td> <td>14 (dos quais 6 oferecem saída PWM)</td> </tr> <tr> <td>Pinos de entrada analógica</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Corrente DC por I / O</td> <td>40 mA</td> </tr> <tr> <td>Corrente DC no pino 3.3V</td> <td>50 mA</td> </tr> <tr> <td>Memória Flash</td> <td>32 KB ( ATmega328 ), dos quais 0,5 KB utilizados pelo carregador de inicialização</td> </tr> <tr> <td>SRAM</td> <td>2 KB ( ATmega328 )</td> </tr> <tr> <td>EEPROM</td> <td>1 KB ( ATmega328)</td> </tr> <tr> <td>Clock</td> <td>16 MHz</td> </tr> </table>	Microcontrolador	ATmega328	Tensão de funcionamento	5V	Tensão de entrada(recomendado)	7 - 12 V	Tensão de entrada (limites)	6 - 20 V	Digital I/O	14 (dos quais 6 oferecem saída PWM)	Pinos de entrada analógica	6	Corrente DC por I / O	40 mA	Corrente DC no pino 3.3V	50 mA	Memória Flash	32 KB ( ATmega328 ), dos quais 0,5 KB utilizados pelo carregador de inicialização	SRAM	2 KB ( ATmega328 )	EEPROM	1 KB ( ATmega328)	Clock	16 MHz
Microcontrolador	ATmega328																								
Tensão de funcionamento	5V																								
Tensão de entrada(recomendado)	7 - 12 V																								
Tensão de entrada (limites)	6 - 20 V																								
Digital I/O	14 (dos quais 6 oferecem saída PWM)																								
Pinos de entrada analógica	6																								
Corrente DC por I / O	40 mA																								
Corrente DC no pino 3.3V	50 mA																								
Memória Flash	32 KB ( ATmega328 ), dos quais 0,5 KB utilizados pelo carregador de inicialização																								
SRAM	2 KB ( ATmega328 )																								
EEPROM	1 KB ( ATmega328)																								
Clock	16 MHz																								

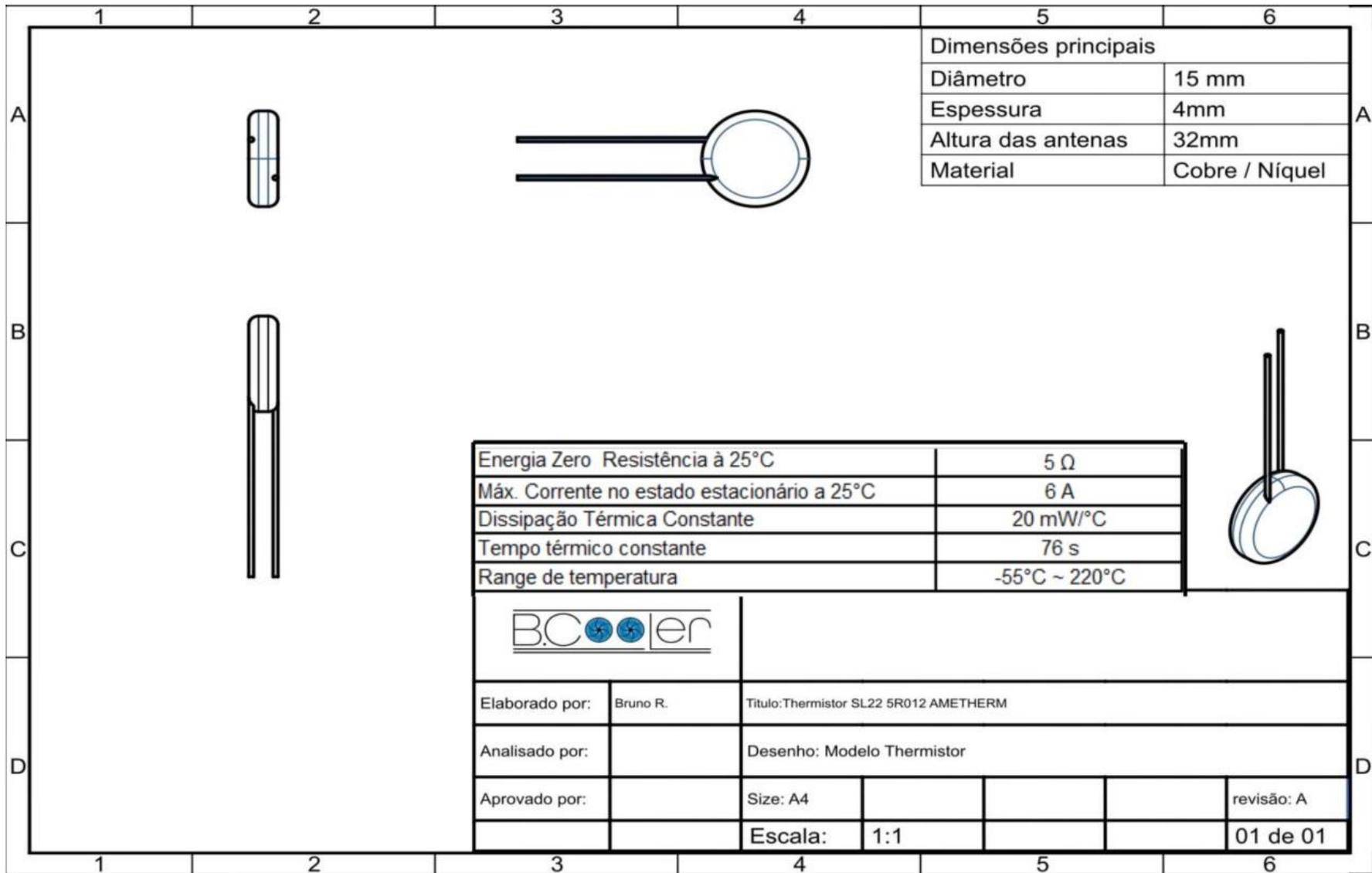
  

					
Elaborado por:	Bruno R.	Titulo:Arduino UNO			
Analisado por:		Desenho: Modelo Arduino			
Aprovado por:		Size: A4			revisão: A
		Escala:	1:1		01 de 01

**APÊNDICE 2 - DIMENSIONAMENTO VENTONHA**



### **APÊNDICE 3 - DIMENSIONAMENTO TERMISTOR**



**APÊNDICE 4 - FMEA**

DFMEA - Design Failure Mode and Effect Analysis

Sistema de Arrefecimento FSAE Eléctrico

Responsível: João Victor Penedo

1

Key Date: 18/12/2021

1

Preparede by: Grupo B.Cooler

Grupo B.Cooler

Item	Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Severity	Classification	Potential Cause(s) of Failure	Current Design Controls Prevention	Occurrence	Current Design Controls Detection	Detection	R P N	Recommended Action(s)	New SEV	New OCC	New DET	New RPN
Ventoinha	Fornecer fluxo de ar	Quebra das pás	Baixa convecção, aumento da temperatura do pack	7	1	Rotação excessiva	Monitorar corrente e tensão	7	Medição da rotação	1	49	Nenhuma ação necessária	7	7	1	49
		Quebra do eixo das pás	Baixa convecção, aumento da temperatura do pack	7	1	Rotação excessiva	Monitorar corrente e tensão	7	Medição da rotação	1	49	Nenhuma ação necessária	7	7	1	49
	Emitir ruído	Rotação baixa	Funcionamento inadvertido	1	9	Rolamento inadequado Perfil das hélices	Selecionar rolamento	7	Medição da rotação	1	7	Nenhuma ação necessária	1	7	1	7
	Receber comandos	Conexão defeituosa	Não acionamento	7	7	Oxidação Choques com o componente Desgaste do conector	Selecionar material adequado e assegurar fixação do componente	7	Dupla checagem de conexão antes e durante o funcionamento do sistema	3	147	Substituir o modo de conexão e fixação	7	7	2	98
Chicote	Conduzir corrente	Perda de características condutoras	Componentes não são acionados	8	8	Material inadequado	Selecionar material adequado	7	Verificar o funcionamento do sistema	1	56	Nenhuma ação necessária	8	7	1	56
	Transmitir dados	Deterioração dos cabos	Intermitência ou interrupção da transmissão de dados	8	7	Oxidação Choques com o componente Desgaste do conector	Assegurar melhor fixação	7	Dupla checagem de conexão antes e durante o funcionamento do sistema	1	56	Nenhuma ação necessária	8	7	1	56
	Conectar componentes	Afrouxamento das conexões cabos	Funcionamento prejudicado	7	7	Oxidação Choques com o componente Desgaste do conector	Assegurar melhor fixação	7	Dupla checagem de conexão antes e durante o funcionamento do sistema	3	147	Substituir componente	7	7	3	147
Termopar	Aquisitar dados	Sensor descalibrado	Medição imprecisa	7	5	Precisão inadequada Precisão inadequada	Selecionar componente e realizar manutenção	7	Monitorar temperatura do pack e verificar calibração em testes prévios	5	245	Adicionar mais sensores ao sistema	7	7	2	98
	Enviar dados	Conexão do sensor defeituosa	Aquisição de dados imprecisa e inadequação da operação do sistema	7	7	Precisão inadequada Oxidação Choques com o componente	Selecionar material adequado e assegurar fixação do componente	7	Dupla checagem de conexão antes e durante o funcionamento do sistema	6	294	Substituir modo de conexão e fixação	7	7	3	147
		Deterioração do cabo	Intermitência ou interrupção da transmissão de dados	7	7	Desgaste do material do cabo e conector	Emprego adequado dos equipamentos selecionados	7	Dupla checagem de conexão antes e durante o funcionamento do sistema	1	49	Nenhuma ação necessária	7	6	1	42
Fluido de arref	Dissipar calor	Temperatura de entrada elevada	Queda na eficiência da troca de calor	7	10	Variabilidade da temperatura do ar	Selecionar componente e realizar manutenção adequada	7	Monitorar a temperatura do pack e medir pressão nos dutos de entrada	6	294	Selecionar materiais resistentes e realizar mais manutenção	7	7	3	147
		Ineficiência na troca de calor	Aumento da temperatura do pack	7	2	Material inadequado	Selecionar fluido adequado	7	Monitorar a temperatura do pack	3	147	Testar novos fluidos	7	7	2	98
			Aumento do consumo de energia	5		Material inadequado	Selecionar fluido adequado	7	Monitorar a temperatura do pack	3	105	Monitorar a autonomia das baterias	5	7	2	70
Conectores	Conectar chicotes	Deterioração do componente	Componente solto	8	7	Oxidação Choques com o componente Desgaste do conector Imperícia no manuseio	Selecionar material adequado e melhorar fixação do componente	7	Dupla checagem de conexão antes e durante o funcionamento do sistema	3	168	Substituir modo de conexão e fixação	8	7	2	112
	Fixar chicotes	Quebra do componente	Intermitência na transmissão Cessar a transmissão	8	11	Fadiga, choques e oxidação	Assegurar melhor fixação	7	Dupla checagem de conexão antes e durante o funcionamento do sistema	3	168	Substituir componente	8	7	2	112
Unidade de controle	Receber dados	Conexão defeituosa	Intermitência na transmissão	8	7	Fadiga, choques e oxidação Imperícia no manuseio	Assegurar melhor fixação	7	Dupla checagem de conexão antes e durante o funcionamento do sistema	3	168	Substituir o modo de conexão e fixação	8	7	3	168
		Mau funcionamento dos circuitos	Leitura incorreta dos dados	7	6	Fadiga, defeito na fabricação	Selecionar componente adequado	7	Verificar o funcionamento do sistema	5	245	Manutenção periódica e testes	7	7	4	196
	Analisar dados	Código criado não atende às necessidades do projeto	Leitura incorreta dos dados	7	4	Código/dados corrompidos Interpretação incorreta dos dados	Realizar testes de verificação e revisão da efetividade do código	7	Verificar o funcionamento do sistema e comparar com o comportamento esperado	6	294	Otimização do código e revisão dos métodos usados para criá-lo	7	7	3	147
	Enviar comandos	Falha na conexão	Sistema inoperante	9	3	Defeito na fabricação da placa Fadiga, choques e oxidação	Pré teste do protótipo Assegurar melhor fixação	7	Testes e experimentos com resultados previsíveis Dupla checagem de conexão	6	126	Testes periódicos com métodos redundantes de Sistema de aviso visual sobre a atividade	9	7	2	126

## **APÊNDICE 5 - BUSINESS MODEL CANVAS**

## Business Model Canvas – B.Cooler

 <p><b>Parceiros Chave</b></p> <p>Empresas de softwares de simulação</p> <p>Empresas do ramo de sistemas de ventilação e bombeamento</p> <p>Fabricantes de fluidos de arrefecimento</p> <p>Fabricantes de baterias</p> <p>Empresas de instrumentação</p> <p>Empresa de testes</p> <p>Ferramentas de controle</p>	 <p><b>Atividades Chave</b></p> <p>Projetar sistemas de arrefecimento</p> <p>Simulações e Dimensionamentos</p> <p>Testes dinâmicos e de bancada</p> <p>Prospecção de clientes</p> <p>Divulgação</p> <hr/>  <p><b>Recursos Chave</b></p> <p>Softwares de simulação, modelagem e programação (Ansys, CAD, Matlab)</p> <p>Instrumentos e equipamentos para testes de protótipo</p>	 <p><b>Oferta de Valor</b></p> <p>Sistemas de controle térmico para aumento da eficiência de baterias de veículos elétricos.</p>	 <p><b>Relacionamento</b></p> <p>Atendimento personalizado</p> <p>Co-criações</p> <hr/>  <p><b>Canais</b></p> <p>Congressos</p> <p>Feiras</p> <p>Website B.Cooler e redes sociais</p> <p>Publicações científicas</p> <p>Revistas</p>	 <p><b>Segmentos de Clientes</b></p> <p>Equipes FSAE</p> <p>ATVs elétricos</p> <p>Motocicletas elétricas</p> <p>Veículos de passeio</p> <p>Veículos especiais</p> <p>Veículos pesados de transporte urbano</p> <p>Veículos comerciais</p> <p>Segmentos de veículos levíssimos elétricos</p>
 <p><b>Estrutura de Custos</b></p> <p>Custos Fixos: Aluguel de softwares Mão-de-obra Escritório de engenharia</p> <p>Custos Variáveis: Viagens comerciais Componentes para protótipos Área de testes</p>		 <p><b>Fontes de Receita</b></p> <p>Vendas de projetos</p>		

**APÊNDICE 6 - CANVAS DE PROJETO**

Grupo: B.Cooler		Pitch: Sistema de Arrefecimento para Baterias do F-FEI Elétrico			
<b>JUSTIFICATIVAS</b> <p>Demanda por EVs sobe</p> <p>Gerenciamento térmico é desafio ainda</p> <p>FSAE-e pode se beneficiar com o projeto</p>	<b>PRODUTO</b> <p>Metodologia de projeto de um sistema de arrefecimento para as baterias do FSAE FEI Elétrico</p>	<b>STAKEHOLDERS</b> <p>Equipe Fórmula FEI Elétrico</p> <p>FEI Grupo B.Cooler</p> <p>Professores envolvidos no TCC e nas equipes dos fórmulas</p>	<b>PREMISSAS</b> <p>Existe a possibilidade de projetar um sistema complacente às regras e eficiente ao mesmo tempo</p> <p>O funcionamento das baterias pode melhorar com o sistema projetado</p>	<b>RISCOS</b> <p>Sistema projetado inadequado ao regulamento</p> <p>Sistema projetado ineficaz</p> <p>Não alcançar os objetivos</p>	
<b>OBJ SMART</b> <p>Criar um sistema de arrefecimento para as baterias do F-FEI-e, que melhore seu funcionamento e obedeça ao regulamento vigente.</p>	<b>REQUISITOS</b> <p>Obedecer o regulamento das competições da SAE</p> <p>Promover arrefecimento via ventilação para as baterias</p> <p>Sistema deve funcionar bem nas competições</p> <p>Deve adicionar o mínimo de massa ao carro sem lesar a função de ventilação</p>	<b>EQUIPE</b> <p>Marketing e Custos</p> <p>Modeling &amp; Simulation</p> <p>Projeto</p> <p>Protótipos</p> <p>Testes Dinâmicos</p>	<b>GRUPOS DE ENTREGAS</b> <p>Mapa do mkt, valor do prod</p> <p>Simul., comp., validações</p> <p>6sigma, Ishikawa, mapa geral</p> <p>3D, adequar ao carro, valid.</p> <p>Valid em campo / hardware ITL</p>	<b>LINHA DO TEMPO</b>	
<b>BENEFÍCIOS</b> <p>Prevenção contra <i>thermal runaway</i></p> <p>Maior durabilidade</p> <p>Maior controle do funcionamento da bateria</p> <p>Aumento de autonomia</p>	<p>Fácil manutenção</p> <p>Menor custo possível</p> <p>Não comprometer a integridade das baterias</p>	<b>RESTRIÇÕES</b> <p>Regulamento SAE Peso do carro</p> <p>Impedir a entrada de líquidos e partículas sem prejudicar a entrada e saída de gases</p>		<b>CUSTOS</b> <p>Soma de custos de componentes</p>	

