

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

FILIPE FARIA DE MORAES
GABRIELA TORRES GRANDE LECH
LUCA PIVATO BORTALI
LUCAS GALDINO DA SILVA
LUCAS PEREIRA BRITO
ORLITO NUNES DA CRUZ
PEDRO DE OLIVEIRA MOREIRA
RAFAEL VELHO DE OLIVEIRA

JOTUN:

Otimização de Arrefecimento do Sistema de Propulsão Elétrico

São Bernardo do Campo

2021

FILIPPE FARIA DE MORAES
GABRIELA TORRES GRANDE LECH
LUCA PIVATO BORTALI
LUCAS GALDINO DA SILVA
LUCAS PEREIRA BRITO
ORLITO NUNES DA CRUZ
PEDRO DE OLIVEIRA MOREIRA
RAFAEL VELHO DE OLIVEIRA

JOTUN:

Otimização de Arrefecimento do Sistema de Propulsão 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. Orientado pelo Prof. Me. Cleber Willian Gomes.

São Bernardo do Campo

2021

Jotun : otimização de arrefecimento do sistema de propulsão elétrico /
Filipe Faria de Moraes ...[et al.]. São Bernardo do Campo, 2021.
164 p. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Me. Cleber Willian Gomes.

Coorientador: Prof. Dr. Fabio Delatore.

1. Veículo elétrico. 2. eficiência . 3. temperatura. 4. autonomia. I.
Moraes , Filipe Faria de . II. Lech, Gabriela Torres Grande. III. Bortali,
Luca Pivato. IV. Silva, Lucas Galdino da . V. Brito, Lucas Pereira. VI.
Cruz, Orlito Nunes da . VII. Moreira, Pedro de Oliveira. VIII. Oliveira,
Rafael Velho de . IX. Gomes, Cleber Willian, orient. X. Título.

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

FILIFE FARIA DE MORAES
GABRIELA TORRES GRANDE LECH
LUCA PIVATO BORTALI
LUCAS GALDINO DA SILVA
LUCAS PEREIRA BRITO
ORLITO NUNES DA CRUZ
PEDRO DE OLIVEIRA MOREIRA
RAFAEL VELHO DE OLIVEIRA

JOTUN:

Otimização de Arrefecimento do Sistema de Propulsão 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. Orientado pelo Prof. Me. Cleber Willian Gomes.

Comissão julgadora

Prof. Me. Cleber Willian Gomes

Prof. Me. Marco Antonio Zanussi Barreto

São Bernardo do Campo

Data da Aprovação

____/____/____

Primeiramente, dedicamos este trabalho aos nossos familiares que deram todo o suporte e apoio necessários desde o início da graduação. Também gostaríamos de dedicar o projeto ao coordenador Marco Antônio Zanussi Barreto, ao nosso orientador Cleber Willian Gomes e ao nosso coorientador Fabio Delatore pelo suporte acadêmico e técnico, estímulo e motivação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaríamos de agradecer às nossas famílias por estarem presentes em todas as etapas da graduação, nos apoiando e torcendo por nós em todos os momentos, além de serem nossas fontes de força e inspiração.

Ao nosso orientador, Prof. Me. Cleber Willian Gomes, por compartilhar seus conhecimentos, nos guiar e nos manter motivados e focados durante todo o desenvolvimento do projeto.

Ao nosso coorientador, Prof. Dr. Fabio Delatore, por todo o auxílio técnico e estímulo acadêmico.

Ao coordenador, Prof. Me. Marco Antonio Zanussi Barreto, pelos ensinamentos, acompanhamento e colaboração desde o início do trabalho.

Aos professores, Prof. Dr. Paulo Eduardo B. de Mello, Prof. Dr. Bruno Chierregatti, Prof. Me. Mauro Moraes de Souza, Prof. Dr. Cyro Albuquerque, Prof. Me. Francisco Lameiras e Prof. Me. Rodrigo Bernardello Unzueta, pelo auxílio e pelas contribuições dadas neste projeto.

A todos do Centro Universitário FEI que ao longo destes anos de vida acadêmica contribuíram para nossa formação.

Finalmente, somos gratos a todos que de alguma forma contribuíram e agregaram para o desenvolvimento desse trabalho e para a nossa formação.

Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.

- Ayrton Senna

RESUMO

Por volta de 1800, quando ainda não existia o conhecido carro a combustão, a ideia do veículo elétrico já seria criada. Porém esta ideia ainda teria muitas dificuldades para ser implementada, sendo superada pelo veículo movido a combustão interna que se mantém presente na sociedade no século 21. Após anos de estudos e desenvolvimento tecnológico, a montadora de veículos Toyota lançou em 1997 o primeiro veículo híbrido produzido em massa no Japão ajudando a crescer a imagem do veículo movido a energia elétrica no mundo. Em 2006, uma pequena startup do vale do silício, Tesla Motors, começa a produzir carros totalmente elétricos e luxuosos que conseguem rodar 322 quilômetros em uma única carga. Com isso, a indústria começou a aquecer e o desenvolvimento de veículos movidos a energia elétrica cresce mais a cada dia. Logo, com a crescente do mercado, o desenvolvimento sobre veículos elétricos se torna necessário e, com isso, dificuldades e desafios se tornam cada vez mais aparentes. O conjunto de propulsão deste tipo de veículo é composto principalmente pelo motor elétrico e pelo inversor, estes que transformam a energia elétrica proveniente das baterias em energia cinética movimentando o veículo, e quando existe a conversão de energia existe também a perda, afetando assim eficiência destes componentes, o que afeta diretamente a autonomia do veículo em geral. A grande questão apresentada no estudo leva em consideração que ambos os componentes possuem divergentes faixas de eficiência em função da temperatura, tornando-se o ponto de melhoria focal deste projeto. Por conta disso, o trabalho leva em consideração a criação de um sistema de arrefecimento que possibilite temperaturas de operação diferentes em cada componente e a estabilização delas pelo maior período possível, podendo assim minimizar as perdas térmicas presentes no sistema para gerar melhoras na eficiência de cada componente e, conseqüentemente, melhorar a eficiência global do veículo e a autonomia por carga. Portanto, será apresentado neste estudo tendências futuras para certificação da relevância dos assuntos tratados, e, por fim, o desenvolvimento e cálculos realizados para confirmação das expectativas apresentadas.

Palavras-chave: Veículo elétrico. Motor elétrico. Inversor. Eficiência. Temperatura. Autonomia.

ABSTRACT

Around 1800, when the well-known combustion car did not exist, the idea of the electric vehicle would be created. However, this idea would still have many difficulties to be implemented, being overcome by the internal combustion vehicle that remains present in society in the 21st century. After years of studies and technological development, Toyota Motor Corporation launched in 1997 the first mass-produced hybrid vehicle in Japan, helping to grow the image of the electric-powered vehicle in the world. In 2006, a small Startup from Silicon Valley, Tesla Motors, starts producing fully electric and luxurious cars that can run 322 kilometers on a single charge. As a result, the industry started to heat up and the development of vehicles powered by electric energy grows more every day. Soon with the growing market, the development of electric vehicles becomes necessary and with this difficulties and challenges become more and more apparent. The propulsion set of this type of vehicle is mainly composed by the electric engine and the inverter, which transform the electric energy from the batteries into kinetic energy moving the vehicle, and when there is energy conversion there is also loss, thus affecting their efficiency, which impacts directly the range of the vehicle in general. The major issue presented in the study considers that both components have different efficiency ranges as a function of temperature, becoming the focal point of improvement for this project. For this reason, the work takes into account the creation of a cooling system that allows different operating temperatures in each component and their stabilization for the longest possible period, thus being able to minimize the thermal losses present in the system to generate improvements in the efficiency of each component and consequently improve the overall efficiency of the vehicle and the range per charge. Therefore, in this study, future trends will be presented to certify the relevance of the matters dealt with, and, finally, the development and calculations carried out to confirm the expectations presented.

Keywords: Electric vehicle. Electric motor. Inverter. Efficiency. Temperature. Autonomy

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Demonstração a queda no preço médio das baterias	p. 14
Figura 2	Crescimento Mundial de vendas de veículos elétricos	p. 15
Figura 3	<i>Golden Circle</i>	p. 18
Figura 4	Fluxograma das perdas no sistema de propulsão do veículo	p. 18
Figura 5	Arrefecimento a ar com sistema forçado	p. 22
Figura 6	Sistema refrigerado a fluido indireto	p. 22
Figura 7	Sistema refrigerado a fluido direto	p. 22
Figura 8	Sistema de arrefecimento combinado	p. 23
Figura 9	Sistema de arrefecimento com mudança de fase	p. 24
Figura 10	<i>Storyboard</i>	p. 30
Figura 11	<i>Boundary Diagram</i>	p. 31
Figura 12	Representação da ferramenta <i>FAST</i>	p. 34
Figura 13	<i>P-Diagram</i>	p. 35
Figura 14	Representação do <i>WOIS</i>	p. 37
Figura 15	<i>WOIS</i> do projeto	p. 37
Figura 16	Esquema do sistema de arrefecimento de veículo a combustão	p. 39
Figura 17	Bomba d'água BMW	p. 41
Figura 18	Radiador utilizado nos caminhões VOLVO	p. 41
Figura 19	Válvula de controle	p. 42
Figura 20	Despejamento de fluido de arrefecimento	p. 42
Figura 21	Mangueiras automotivas	p. 43
Figura 22	Motor-gerador do <i>Toyota Prius 2004</i>	p. 45
Figura 23	Dimensões do inversor do veículo base	p. 46
Figura 24	Bomba d'água <i>Toyota</i>	p. 47
Figura 25	Radiador <i>Toyota Prius</i>	p. 48
Figura 26	Válvula termostática <i>MTE-THOMSON</i>	p. 49
Figura 27	Exemplo de fluido de arrefecimento	p. 49
Figura 28	<i>Business Model Canvas</i>	p. 52
Figura 29	Trocador de corrente paralela	p. 56
Figura 30	Trocador contra-corrente	p. 56
Figura 31	Trocador de fluxo cruzado	p. 57

Figura 32	Trocador casco e tubo	p. 57
Figura 33	Resistência térmica total	p. 58
Figura 34	Eficiência do inversor	p. 62
Figura 35	Dimensões adotadas inicialmente para as aletas	p. 65
Figura 36	Cálculo de D_h para diferentes seções de tubulação	p. 67
Figura 37	Condição de escoamento do fluido internamente nos tubos	p. 70
Figura 38	Modelo equivalente do capacitor para estudo	p. 76
Figura 39	Gráfico da capacitância em função da temperatura	p. 76
Figura 40	Gráfico da capacitância em função da frequência	p. 77
Figura 41	Gráfico de ESR em função da frequência	p. 77
Figura 42	Gráfico de ESR em função da temperatura	p. 78
Figura 43	Gráfico de fator de dissipação em função da frequência	p. 78
Figura 44	Gráfico de fator de dissipação em função da temperatura	p. 79
Figura 45	Gráfico de temperatura em função da corrente	p. 79
Figura 46	Gráfico da capacitância em função da temperatura	p. 80
Figura 47	Diagrama de <i>Moody</i>	p. 83
Figura 48	Comprimentos equivalentes (m)	p. 85
Figura 49	Comprimento equivalentes apresentados	p. 86
Figura 50	Desenho esquemático do sistema	p. 87
Figura 51	Curva característica da instalação	p. 88
Figura 52	Representação da bomba elétrica utilizada VP50N	p. 89
Figura 53	Curva característica da bomba (CCB)	p. 89
Figura 54	Intersecção entre a CCI e CCB	p. 90
Figura 55	Válvula eletrônica exemplo	p. 93
Figura 56	Representação do <i>Power Split Device do Toyota Prius</i>	p. 98
Figura 57	Ciclo FTP75	p. 99
Figura 58	Gráfico de eficiência por tempo do motor elétrico no ciclo FTP75	p. 102
Figura 59	Gráfico de eficiência por tempo do inversor no ciclo FTP75	p. 102
Figura 60	Veículo elétrico base	p. 110
Figura 61	Dados do veículo base	p. 110
Figura 62	Eficiência do motor mais inversor x Torque do veículo base	p. 111
Figura 63	Ciclo FTP75	p. 111
Figura 64	Ciclo NEDC	p. 112

Figura 65	Energia disponível para o motor no ciclo FTP75	p. 113
Figura 66	Perdas no veículo no ciclo FTP75	p. 113
Figura 67	Distância percorrida no ciclo FTP75	p. 114
Figura 68	Energia disponível no veículo no ciclo NEDC	p. 114
Figura 69	Perdas no veículo no ciclo NEDC	p. 115
Figura 70	Distância percorrida no ciclo NEDC	p. 115
Figura 71	Vista em corte da geometria padrão	p. 117
Figura 72	Divisão dos componentes	p. 117
Figura 73	Conexões	p. 118
Figura 74	Refinos do <i>Mesh</i>	p. 118
Figura 75	Número de elementos e nódulos	p. 119
Figura 76	Condições de contorno	p. 119
Figura 77	Condições de simulação	p. 120
Figura 78	Condições do nanofluido	p. 120
Figura 79	Condições do fluido 50-50 água e etilenoglicol	p. 121
Figura 80	Interações feitas pelo <i>ansys</i>	p. 122
Figura 81	Comportamento do fluido base dentro do tubo	p. 122
Figura 82	Comportamento do nanofluido dentro do tubo	p. 123
Figura 83	Saída do tubo com o fluido base	p. 123
Figura 84	Saída do tubo com o nanofluido	p. 124
Figura 85	Temperatura na parede do tubo com o fluido base	p. 124
Figura 86	Temperatura na parede do tubo com o nanofluido	p. 124
Figura 87	Temperatura aleta com o fluido base	p. 125
Figura 88	Temperatura aleta com o nanofluido	p. 125
Figura 89	Seção transversal com fluido base	p. 126
Figura 90	Seção transversal com nanofluidos	p. 126
Figura 91	Radiador modelado por NX	p. 128
Figura 92	Modelo reduzido do radiador dedicado	p. 128
Figura 93	Representação esquemática do sistema de arrefecimento para o motor elétrico	p. 130
Figura 94	Representação esquemática do sistema de arrefecimento para o inversor	p. 131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Ponto de partida para o estudo	p. 20
Tabela 2	Matriz de Decisão	p. 26
Tabela 3	Matriz de Confirmação	p. 26
Tabela 4	Componentes x Função	p. 32
Tabela 5	Classificação das funções	p. 33
Tabela 6	Trecho do SFMEA desenvolvido pelo grupo	p. 36
Tabela 7	Eficiência do motor elétrico do <i>Toyota Prius</i> 2004	p. 61
Tabela 8	Dimensões frontais do radiador adotado	p. 64
Tabela 9	Dimensões adotadas para tubulação e das aletas do radiador do motor	p. 65
Tabela 10	Dados iniciais dos materiais	p. 66
Tabela 11	Condutividade térmica de vários sólidos e líquidos	p. 93
Tabela 12	Modelos utilizados na previsão das propriedades térmicas dos nanofluidos	p. 94
Tabela 13	Diferentes tipos de nanofluidos	p. 95
Tabela 14	Dados do veículo <i>Toyota Prius</i>	p. 99
Tabela 15	Representação das eficiências com os cálculos apresentados	p. 102
Tabela 16	Eficiências médias do sistema no ciclo em diferentes temperaturas	p. 103
Tabela 17	Demonstração da melhor situação no ciclo	p. 103
Tabela 18	Demonstração da pior situação no ciclo	p. 103
Tabela 19	Tamanho dos elementos	p. 118

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 O PROBLEMA E A MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO	12
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	12
2 TENDÊNCIAS PARA O FUTURO.....	14
3 CONCEITO: JOTUN	17
3.1 PROBLEMA E PROPÓSITO	17
3.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE.....	19
3.3 <i>TARGET</i>	19
3.4 <i>BENCHMARKING</i>	21
3.5 MATRIZ DE DECISÃO	24
3.5.1 Vantagens e desvantagens do sistema.....	28
4 FERRAMENTAS DE ENGENHARIA	30
4.1 STORYBOARD	30
4.2 <i>BOUNDARY DIAGRAM</i>	31
4.3 ANÁLISE DE VALOR.....	32
4.4 <i>P-DIAGRAM</i>	34
4.5 <i>FMEA</i>	35
4.6 <i>WOIS</i>	36
5 CONCEITO DO SISTEMA	39
5.1 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE ARREFECIMENTO	39
5.1.1 Sumário do sistema de arrefecimento.....	40
6 ENGENHARIA REVERSA	44
6.1 MOTOR ELÉTRICO	44
6.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA	45
6.3 BOMBA D' ÁGUA.....	46
6.4 RADIADOR.....	47
6.5 VÁLVULA TERMOSTÁTICA	48
6.6 FLUIDO DE ARREFECIMENTO.....	49
6.7 TUBULAÇÃO	49
7 BUSINESS MODEL CANVAS	51
8 FUNDAMENTO TEÓRICO	54
8.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	54

8.1.1 Trocador de calor	55
8.1.1.1 Trocador de duplo tubo	55
8.1.2 Coeficiente global de transferência de calor	57
8.1.3 Fator de incrustação	59
8.1.4 Radiador	59
8.1.4.1 Cálculos para radiador dedicado ao <i>powertrain</i>	60
8.2 CAPACITOR DO INVERSOR.....	75
8.3 TUBULAÇÃO E BOMBA D'ÁGUA.....	80
8.4 VÁLVULA TERMOSTÁTICA	92
8.5 NANOFLUIDOS.....	93
9 CÁLCULOS DA MELHORIA	97
9.1 MOTOR E INVERSOR	98
9.2 FLUIDO DE ARREFECIMENTO: NANOFLUIDO	103
10 MODELAMENTO DA SIMULAÇÃO	109
10.1 AVL CRUISE.....	109
10.2 ANSYS: FLUENT.....	116
10.2.1 Preparação da geometria padrão	116
10.2.2 Criação da malha	117
10.2.2.1 Geometria	117
10.2.2.2 Conexões	117
10.2.2.3 <i>Mesh</i>	118
10.2.2.4 Condições de contorno	119
10.2.3 <i>Fluent</i>	119
10.2.3.1 Criação do fluido base	120
10.2.3.2 Condições de contorno	121
10.2.4 Resultados	122
11 MODELAMENTO 3D	128
11.1 MONTAGEM ESQUEMÁTICA DO SISTEMA	129
12 CUSTO DO PROJETO	132
13 CONCLUSÃO	134
REFERÊNCIAS	Erro! Indicador não definido.
APÊNDICE A – BOUNDARY DIAGRAM	146
APÊNDICE B – ANÁLISE DE VALOR	147
APÊNDICE C – <i>P-DIAGRAM</i>	148

APÊNDICE D – ENGENHARIA REVERSA.....	149
APÊNDICE E – FMEA.....	150
APÊNDICE F – Mapas de eficiência do motor e inversor por temperatura	155
APÊNDICE G – Tabela de propriedades mecânicas de materiais considerados no trabalho	161
APÊNDICE H – Desenho Radiador	162
APÊNDICE I – Desenho Válvula Termostática	163
APÊNDICE J – Desenho da montagem esquemática do sistema dedicado do motor elétrico.....	164
APÊNDICE K – Desenho da montagem esquemática do sistema dedicado do inversor	165

1 INTRODUÇÃO

Por volta de 1800, quando ainda não existia o conhecido carro a combustão, inventores da Hungria, Holanda e dos Estados Unidos imaginavam um meio de transporte movido a bateria, e apesar de suas dificuldades e suas barreiras tecnológicas, a ideia do veículo elétrico já seria criada. Apesar de uma ideia precoce, o veículo movido a baterias ainda teria muitas dificuldades para ser implementado, portanto foi este superado pelo veículo movido a combustão interna, que se mantém presente na sociedade no século XXI (VENDITTI, 2020).

Após anos de estudos e desenvolvimento tecnológico, a montadora de veículos *Toyota* lançou em 1997 o primeiro veículo híbrido produzido em massa no Japão, e no ano 2000 lançado mundialmente, atingindo grande sucesso com celebridades e ajudando a crescer a imagem do veículo movido a energia elétrica no mundo. Em 2006, mais um marco importante para indústria de veículos elétricos se inicia, uma pequena *startup* do vale do silício, *Tesla Motors*, começa a produzir carros totalmente elétricos e luxuosos que conseguem rodar 322 quilômetros (km) em uma única carga. Com isso, a indústria começou a aquecer e o desenvolvimento de veículos movidos a energia elétrica cresce mais a cada dia. Com incentivos governamentais auxiliando as montadoras e leis restringindo cada vez mais o mercado de automóveis movidos a combustão, o carro elétrico tem se tornado cada vez mais atrativo e futuramente mandatório para as montadoras e, conseqüentemente, para o consumidor (VENDITTI, 2020).

Logo, com a crescente do mercado, o desenvolvimento sobre ele se torna necessário e, com isso, dificuldades e desafios são apresentados, sendo o veículo elétrico o ponto chave do trabalho apresentado a seguir. Para que o veículo se movimente é crucial que o mesmo possua um conjunto de baterias, fornecedoras da energia, um motor elétrico, responsável pela movimentação das rodas do veículo convertendo energia elétrica em energia cinética, e um inversor de tensão, responsável por inverter a corrente para que a energia vá das baterias ao motor na tensão desejada, o sistema de arrefecimento, responsável por garantir que os componentes do veículo trabalhem em uma temperatura segura e de melhor eficiência e outros componentes como cabos e conexões presentes no veículo.

O presente trabalho ressalta a importância do sistema de arrefecimento em veículos elétricos, atingindo diretamente sua eficiência energética. Portanto, será apresentado neste estudo tendências futuras para certificação da relevância dos assuntos tratados, e, por fim, desenvolvimento e cálculos para confirmação das expectativas apresentadas.

1.1 O PROBLEMA E A MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO

Analisando as tendências mundiais e todo o contexto do mercado automobilístico atual, junto à vontade de desenvolver um projeto desafiador e ousado, a decisão de trabalhar com veículos elétricos foi tomada.

Ainda que o mercado de veículos híbridos e elétricos tenha apresentado um crescimento vultoso nos últimos anos, é possível encontrar alguns pontos negativos ao analisar algumas situações e comparar o comportamento de veículos a combustão nestes mesmos cenários.

Veículos que sejam movidos à energia elétrica, seja de forma parcial ou completa, possuem meios que reaproveitam parte da energia utilizada e que seria perdida por atrito, calor e outros meios, como é o caso dos freios regenerativos, que convertem energia térmica, produzida pelo atrito entre o disco e a pastilha no ato da frenagem, em energia elétrica a ser utilizada novamente pelo sistema de propulsão. Esse tipo de mecanismo é muito eficiente em circuitos urbanos, onde o freio é amplamente utilizado, garantindo, em alguns casos, até 50km a mais do que projetado pelo computador de bordo. Já no percurso rodoviário, onde os freios são pouco utilizados, dificilmente haverá um ganho expressivo na autonomia que possa garantir uma margem mais segura para se percorrer distâncias mais longas.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Tendo em vista as constatações apresentadas acima, a análise voltou-se para os principais motivos que limitam a performance do conjunto de propulsão e que afetam diretamente a autonomia do veículo.

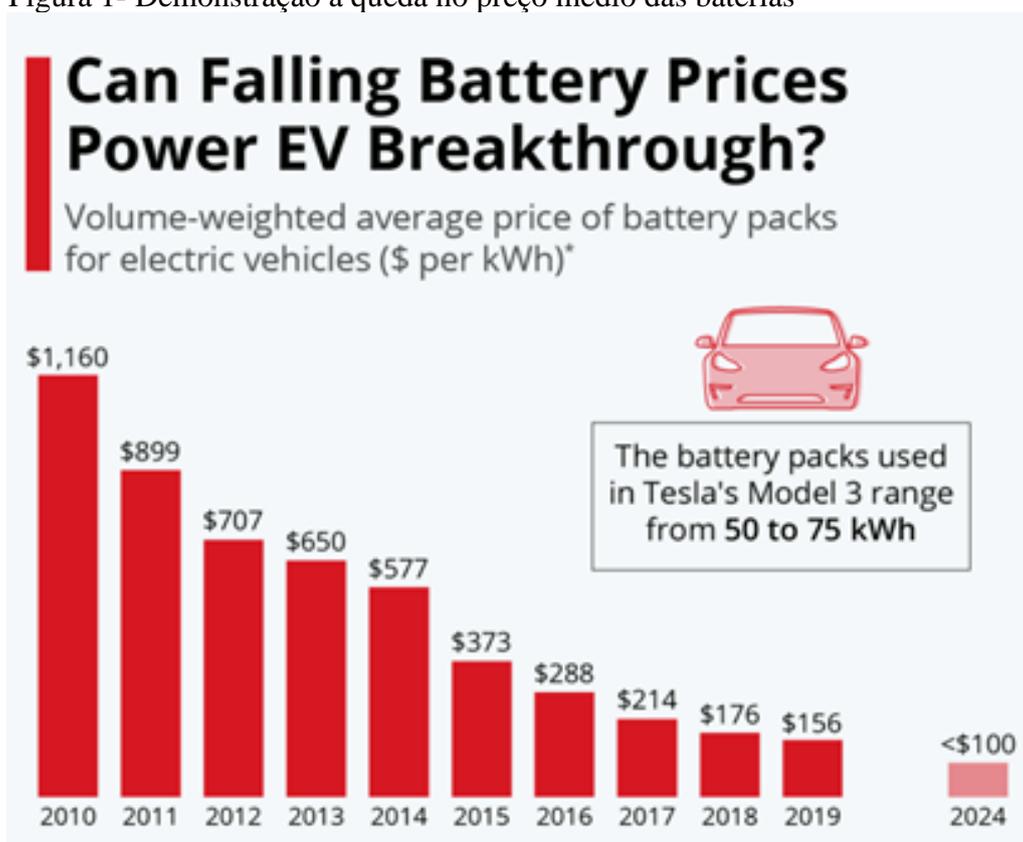
O conjunto de propulsão é composto principalmente pelo motor elétrico e pelo inversor de corrente, dois componentes que possuem divergentes faixas de eficiência em função da temperatura, mas que sofrem da mesma forma com sua variação. A grande questão é que ambos os componentes possuem temperaturas ideais de trabalho que fazem com que as perdas sejam menos significantes, resultando em uma operação mais eficiente.

Por conta disso, o objetivo do trabalho é desenvolver um sistema de arrefecimento que possibilite temperaturas de operação diferentes em cada componente e a estabilização delas pelo maior período possível, de modo que as perdas sejam amenizadas e uma maior autonomia seja atingida.

2 TENDÊNCIAS PARA O FUTURO

Nos últimos anos, o interesse pela eletrificação de veículos tem ganhado força. O aumento de performance em conjunto com redução no impacto ambiental, quando comparado a um veículo de motor a combustão, são os principais motivos desse movimento.

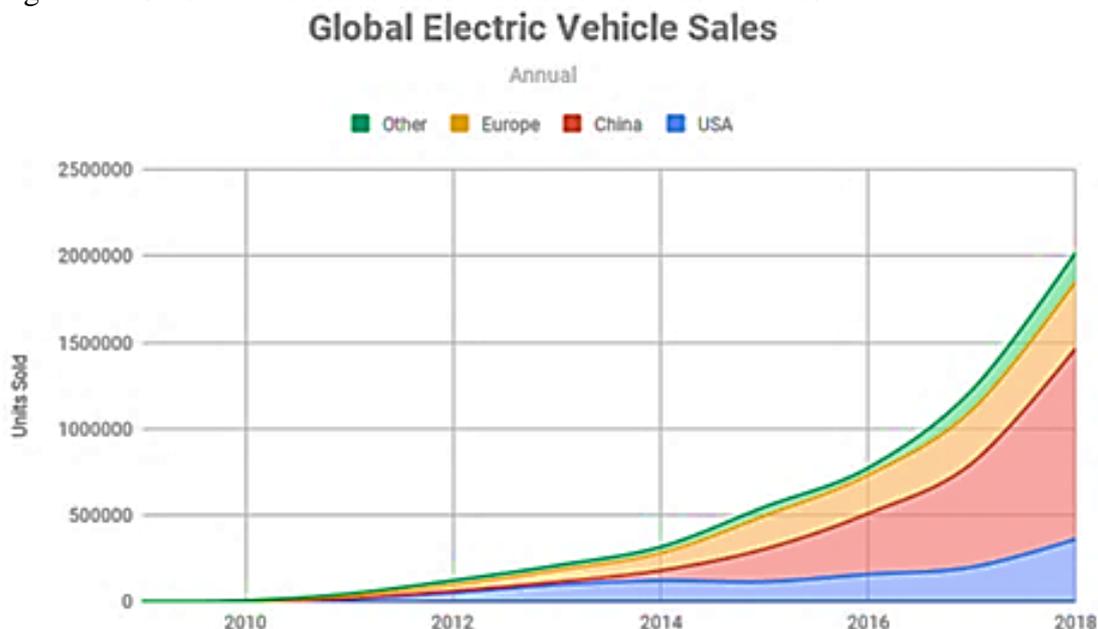
Figura 1- Demonstração a queda no preço médio das baterias



Fonte: Bloomberg NEF *apud* RICHTER, 2020.

Os dados levantados pela *BloombergNEF - Bloomberg New Energy Finance*, representado na Figura 1 acima, uma das líderes no mundo em pesquisa sobre energia limpa, nos mostra a queda no preço médio do *pack* de baterias para veículos elétricos. A redução de 1.160,00 \$/kWh para 156 \$/kWh mostra o avanço que a indústria automotiva adquiriu para a produção de carros elétricos, o que, conseqüentemente, auxilia no desenvolvimento ecológico na indústria veicular.

Figura 2 – Crescimento Mundial de vendas de veículos elétricos



Fonte: GERRARD, 2019.

Conforme a Figura 2 apresentada anteriormente, podemos verificar um aumento nas vendas de veículos elétricos. Segundo o *site Tri-State*, Fornecedora de energia renovável (FITZGIBBON, 2020), presente em três estados americanos, existem cinco razões para esse crescimento:

- a) **A redução da pegada de carbono e emissão de gases de efeito estufa** – O veículo elétrico não produz gases poluentes ao meio ambiente;
- b) **Economia com gasolina** – Segundo o *site*, um americano gasta em média \$2.000 (R\$ 10.860,00) em gasolina todo ano. Com um veículo elétrico o gasto seria em torno de \$1.500 (R\$ 8.145,00);
- c) **Menor custo de manutenção** – Além da economia que será obtida nos gastos com gasolina, também terá como benefício os custos com manutenção: Os carros elétricos não têm um motor que requer óleo para lubrificação, portanto, não teremos necessidade de trocas de óleo e filtro;
- d) **Veículos elétricos estão cada vez mais acessíveis** – Conforme a demanda do consumidor aumentou, as montadoras começaram a oferecer mais modelos e opções. Como resultado, os custos dos veículos elétricos estão começando a diminuir e a tendência é que sejam mais acessíveis com o passar dos anos;
- e) **Veículos elétricos oferecem uma experiência zen de direção** – Os veículos elétricos (*electric vehicles - EV's*) geralmente têm um centro de gravidade mais baixo, que oferece melhor manuseio, conforto e capacidade de resposta. O

motor elétrico proporciona aceleração e desaceleração suaves e um passeio silencioso, todos esses componentes tornam os veículos elétricos agradáveis de dirigir e com ainda mais modelos elétricos sendo oferecidos, certamente encontrará um que se adapte às suas necessidades e estilo.

Com isso, é possível perceber a importância do avanço tecnológico do veículo elétrico, impactando não somente uma melhora na vida das pessoas desde o quesito financeiro até o conforto na dirigibilidade, como também na preservação ambiental (sonora e redução da pegada de carbono).

3 CONCEITO: JOTUN

3.1 PROBLEMA E PROPÓSITO

Uma das ferramentas utilizadas para nortear qualquer projeto é o *Golden Circle*, criada pelo escritor, palestrante motivacional e especialista em liderança inglês Simon Sinek, cuja proposta é auxiliar empresas e líderes a encontrarem um propósito e gerarem impacto por meio de três perguntas, nessa ordem: “Por quê?” “Como?” “O quê?” (SILVA, 2021).

Tal ferramenta busca criar e agregar valor, engajar o público e os stakeholders com uma causa que julguem de importância mútua e inspirar outros a buscarem a mesma meta.

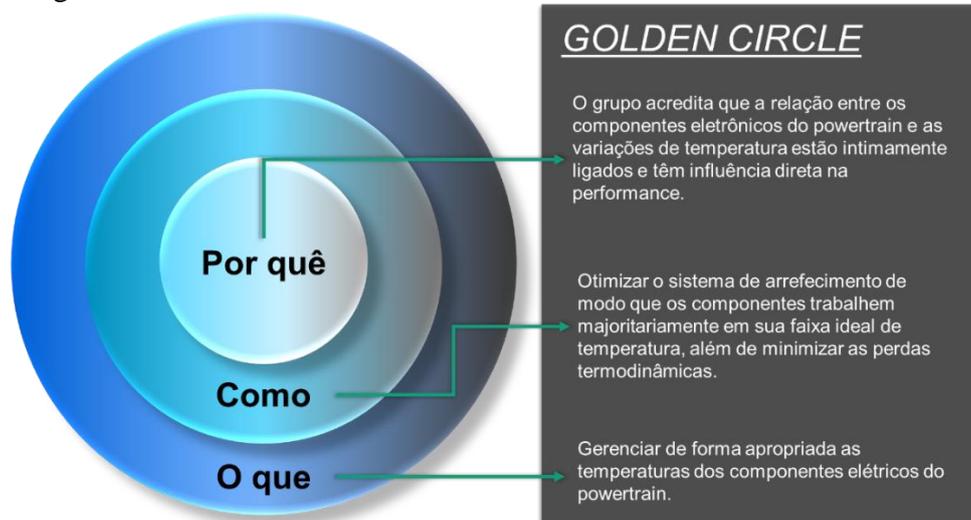
A primeira pergunta (*por quê?*) busca identificar a missão de um projeto ou de uma empresa, o motivo principal da própria existência de algo, razão essa que se encontra no cerne de tudo e é o propósito principal pela criação de uma empresa, projeto, campanha ou empreendimento. Em suma, é a missão de algo.

A segunda pergunta (*como?*) visa buscar os diferentes métodos possíveis para que se alcance o *Porquê*, estabelecendo o planejamento estratégico e um plano de ação para que o propósito seja atingido.

A terceira pergunta (*o quê?*) possui a tarefa de instigar os envolvidos a refletirem sobre os valores e propósitos definidos, pois estes devem ser propagados para as pessoas e stakeholders por algum meio, seja um produto, serviço, ou seja, o que de fato é entregue ao consumidor.

Baseando-se no explicitado abaixo, o grupo reuniu-se para discutir cada pergunta e gerar um *Golden Circle* próprio.

Figura 3 - Golden Circle

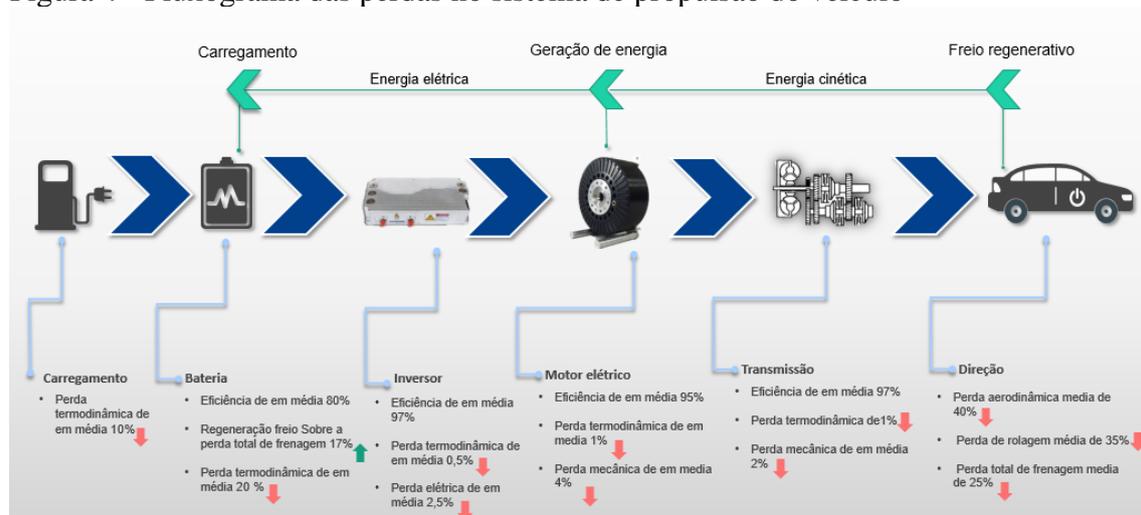


Fonte: Autores.

Após a criação do *Golden Circle*, mostrado na Figura 3, e com o propósito definido, a análise tornou-se mais técnica, pois abordaria as perdas térmicas ao longo do ciclo energético do veículo. Foi então criado um fluxo de energia para que cada segmento de tal ciclo pudesse ser analisado em separado e, concomitantemente, o ciclo como um todo pudesse ser visto.

Analisando o fluxo de energia de um veículo elétrico pode-se mapear as perdas.

Figura 4 - Fluxograma das perdas no sistema de propulsão do veículo



Fonte: Autores.

Dado que inegavelmente a grande tendência do mercado é a eletrificação e que um grande paradigma a ser vencido é a autonomia do veículo em trechos rodoviários, a análise das perdas, representada na Figura 4, é fundamental para auxiliar no desenvolvimento deste assunto. Levando em consideração que a grande maioria dos

estudos e dos investimentos feitos, em termos de eficiência, são focados nas baterias, o interesse do grupo se voltou para os demais componentes elétricos (motor elétrico e inversor), uma vez que existem brechas que podem ser exploradas, como o trabalho na temperatura ideal de funcionamento, procurando reduzir as perdas termodinâmicas e aumentar performance e até autonomia do veículo.

3.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE

Análise de viabilidade é uma ferramenta que auxilia na verificação da viabilidade do projeto, justificando os investimentos que serão destinados ao mesmo, explorando os problemas, analisando os possíveis clientes e verificando as razões para tais justificativas. Estas são fundamentadas na necessidade de redução de perdas energéticas no conjunto propulsor para que seja possível garantir uma melhora na autonomia dos veículos elétricos.

Para isso, foram analisados os seguintes pontos:

- a) **Problema:** As perdas são acentuadas, pois tanto o motor quanto o inversor sofrem com as variações de temperatura. Ambos os componentes possuem suas respectivas temperaturas de maior eficiência, as quais devem ser mantidas pelo maior período possível pelo sistema de arrefecimento do veículo;
- b) **Clientes:** A melhoria proposta é destinada à montadora de forma que essa seja incorporada no projeto do veículo, tornando a empresa o cliente principal;
- c) **Razões a pagar:** Com a melhora na eficiência do grupo propulsor e consequente aumento da autonomia do veículo, o produto torna-se mais competitivo no mercado.

3.3 TARGET

De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos (EUA), um veículo elétrico apresenta perdas distribuídas entre os sistemas presentes nele durante os ciclos de direção (urbano e rodoviário) (UNITED STATES, 2020a). Considerando que este trabalho busca focar no ciclo rodoviário, os sistemas e as perdas referentes a esse ciclo são demonstrados na tabela a seguir:

Tabela 1 - Ponto de partida para o estudo

Sistema	Perda em %
Carregamento da bateria	10%
Acessórios (Ex: Sistema de entretenimento)	2%
Sistemas elétricos	15%
Sistemas elétricos auxiliares	0 a 2%
Energia recuperada pela frenagem regenerativa	6%

Fonte: Adaptado de UNITED STATES, 2020a.

Podemos analisar as perdas do veículo, apresentadas na tabela 1 acima, para assim obtermos um ponto de partida para nossos cálculos e considerações.

As resistências encontradas no veículo, como a resistência do ar e de rolagem, por exemplo, causam uma influência sobre a eficiência global do veículo. Desta forma, este trabalho considera inicialmente os mesmos valores encontrados pelo Departamento de Energia dos EUA. Consolidando os dados mencionados anteriormente, tem-se que a eficiência global de um veículo elétrico fica entre 77% e 79%. Segundo a mesma fonte, a autonomia média dos carros elétricos disponíveis no mercado no ano de 2021 é de 416 km, quando carregados completamente. Assim, concluímos que a eficiência global média de 78% corresponde a 416km/Carga de autonomia.

De acordo com o fluxo de energia do sistema de propulsão elétrico, o motor elétrico tem uma perda média de 5% e o inversor de 3%. Considerando que sem alterar as características elétricas desses componentes (como os materiais responsáveis pelo eletromagnetismo do motor e os semicondutores do inversor) é possível reduzir tais perdas para 3,5% a 4% no motor e 2% no inversor, tem-se que os sistemas elétricos como um todo representariam 12,5% das perdas totais, resultando em uma nova eficiência global média de 80,5%. Tal número corresponde a 430 km de autonomia com uma carga, ou seja, um aumento de 14 km/Carga o que representa 3,26% de aumento na autonomia média dos veículos.

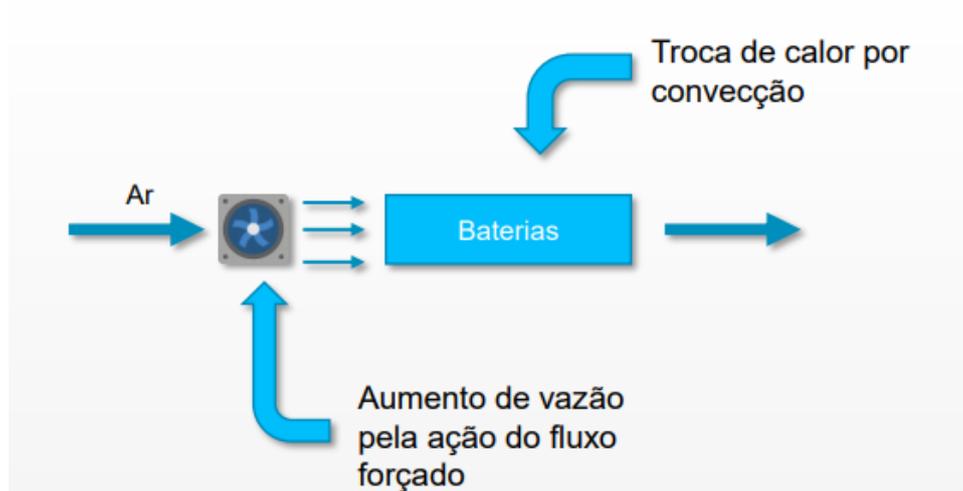
3.4 BENCHMARKING

Sempre presente, e necessário nos veículos, o sistema de arrefecimento passou por diversas melhorias e modificações, passando do sistema simples utilizando somente o ar para trocar calor até a utilização de fluídos desenvolvidos especificamente para o mesmo fim, e, com isto, o desenvolvimento de diversos sistemas para otimizar a passagem deste fluído.

Portanto, para que seja possível entender as motivações e razões para o sistema que será apresentado, deve-se analisar as vantagens e desvantagens de cada sistema já criado na indústria tanto de veículos a combustão como elétricos.

Primeiramente, temos o sistema refrigerado a ar, sistema este no qual o ar frio passa pelo perímetro do motor retirando calor deste, sendo muitas vezes auxiliado pelo uso de aletas, estas que aumentam a área de contato do ar para melhor troca de calor e, também, em muitos dos casos é utilizado o sistema forçado, onde se utiliza de um componente que acelera o ar para passagem pelo motor.

Figura 5 - Arrefecimento a ar com sistema forçado



Fonte: Autores.

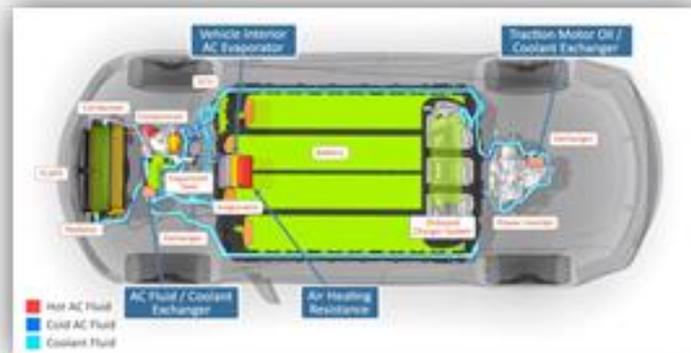
No sistema representado acima, temos vantagens como baixo custo, fácil manutenção, simplicidade e vasto conhecimento adquirido na indústria, porém como desvantagens podemos observar a baixa eficiência, pois a troca de calor é diretamente afetada pela temperatura ambiente e não permite a troca de calor com o veículo parado sem a utilização do sistema forçado.

Para melhorar o sistema, foi introduzido a utilização de fluídos para aumentar a eficiência da troca de calor, onde que para veículos a combustão é possível somente a

utilização de um sistema indireto, no qual o fluido passa por tubos e canais próximos as áreas que necessitam ser resfriadas, e para veículos elétricos é possível a utilização de um sistema adicional ao citado anteriormente o sistema direto, onde a fonte de calor é submergida no fluido.

Com relação ao sistema a ar, a introdução do fluido melhorou a eficiência do sistema e, com isso, a troca de calor deste, porém aumentou a complexidade, a quantidade de componentes para a troca de calor e concedeu mais pontos de falha sobre o sistema de arrefecimento. Se compararmos o sistema indireto em relação ao direto temos uma montagem mais compacta e diversa, porém com mais pontos de falhas no sistema, e comparando o sistema direto em relação ao indireto temos uma melhor uniformidade na troca de calor, com maior intensidade de troca e um sistema pouco explorado na indústria. No entanto, sua montagem pode ser muito complexa e, em caso de falhas, pode afetar diretamente a segurança do veículo.

Figura 6 - Sistema refrigerado a fluido indireto



Fonte: EZEROGU, 2019.

Figura 7 - Sistema refrigerado a fluido direto



Fonte: KANE, 2020.

Nas Figuras 6 e 7 representadas, podemos observar a diferença visual dos sistemas, onde no sistema indireto temos uma visão do fluido passando pelos tubos de resfriamento, enquanto no sistema direto observamos as baterias submergidas no fluido não sendo necessário mostrar os tubos, mesmo que necessários para transportar o fluido para o radiador do veículo.

Com o avanço da tecnologia e com aumento de veículos elétricos nas ruas, os estudos e desenvolvimentos para melhorar o desempenho do carro movido a energia elétrica cresceram e ganharam forma, com isso carros de competição focados em desempenho foram desenvolvidos e são de grande valia para o estudo em questão. A Fórmula – E é uma categoria de automobilismo organizada pela Federação Internacional do Automóvel (FIA) com carros monopostos exclusivamente elétricos, cuja primeira temporada começou no ano de 2014 e se estende até os dias de hoje, que trouxe diversas melhorias aos carros deste segmento, sendo uma delas a melhoria no sistema de arrefecimento do veículo.

Figura 8 - Sistema de arrefecimento combinado



Fonte: BMW..., 2019.

Como mostrado na Figura 8, daremos o nome a este sistema de sistema combinado, pois ele controla a temperatura das baterias e, separadamente, também controla a temperatura do inversor e do motor elétrico. Este sistema traz uma vantagem crucial, tal como uma maior eficiência da energia utilizada no veículo, pois permite que cada componente trabalhe com sua temperatura ideal de trabalho, porém tem seu custo elevado e o dobro de componentes, permitindo assim mais pontos de falhas.

Muito conhecida no mundo automotivo, a Fórmula 1 também traz suas inovações e melhorias ao sistema estudado, porém sendo a mais complicada a se implementar a carros de passeio e utilitários.

Figura 9 - Sistema de arrefecimento com mudança de fase



Fonte: SCARBOROUGH, 2019.

Vemos na Figura 9 acima, que este sistema utiliza a mudança de fase do material. Comumente utiliza-se gelo para que no processo de mudança de fase torne-se água para assim trocar calor com a fonte transmissora de calor, o motor. No entanto, se torna inviável sua implementação, pois se necessitaria que constantemente o condutor dele adicionasse o material sólido no veículo para que o sistema funcionasse da maneira correta.

Como pontos positivos do sistema apresentado, temos que, durante a mudança de fase, há a troca de calor sem aumento da temperatura do material, após o material atingir sua fase líquida há mais uma troca de calor, esta com aumento de temperatura, assim auxiliando para melhor eficiência abaixando a temperatura do sistema, que por trabalhar sempre em seu pico de desempenho, permanece em temperaturas altas e tem a necessidade de um bom sistema de arrefecimento o auxiliando.

3.5 MATRIZ DE DECISÃO

Outra ferramenta importante para a realização de qualquer projeto é a matriz de decisão, que visa facilitar a escolha de uma opção dentre várias outras, analisando os pontos fortes e fracos de todos frente a critérios pré-estabelecidos, de modo a estabelecer notas para cada opção disponível.

Em um instante inicial é estabelecido um parâmetro de comparação, uma referência para as outras opções, com todas as notas parciais na média dos pesos, ou seja, se os pesos forem divididos de 1 a 5, a média 3 será a nota em todos os critérios para essa base de comparação. Essa referência servirá de critério inicial para as outras opções, ao

passo que as notas forem sendo atribuídas, também há o critério qualitativo, como “acima da média”, “abaixo da média” e “na média”, por exemplo.

Um segundo passo é a escolha de critérios que irão nortear a escolha, pois é por meio destes que serão dadas as notas parciais para cada uma das opções possíveis, que serão somadas para gerar a nota final. Dependendo da situação, os critérios poderão possuir pesos diferentes, baseando-se na cultura de uma empresa, nos valores seguidos por ela, ou por características que julguem ser de importância dentro de um ambiente específico.

Após a escolha dos critérios e seus pesos, há então a seleção de todas as possíveis opções a serem analisadas. Vale frisar que todas as possíveis opções devem ser inclusas, pois a matriz de decisão é uma ferramenta de apoio à decisão, sendo altamente subjetiva dependendo de como for utilizada.

Em sequência, cada uma das opções é avaliada baseada nos critérios estabelecidos, de modo a gerar uma tabela com diversas notas. Ao final da análise e discussão, há então a escolha da opção cuja nota total seja a maior dentre as outras.

Da mesma maneira que na Matemática há a prova real para confirmar uma suposição ou dado adotado, a Matriz de Decisão é acompanhada de uma Matriz de Confirmação, cuja proposta é validar a escolha de uma opção na Matriz de Decisão. Nessa Matriz de Confirmação, há a alteração da referência para a opção escolhida na Matriz de Decisão, de modo que, caso a nota total de uma opção na Matriz de Confirmação seja maior que a nota total da nova referência, uma nova Matriz de Decisão deverá ser montada, até o ponto em que a Matriz de Confirmação confirme a escolha da Matriz de Decisão.

As figuras abaixo explicitam ambas as tabelas geradas para o Projeto *Jotun*:

Tabela 2 - Matriz de Decisão

Critérios	Peso	Sistema de arrefecimento indireto	Sistema de arrefecimento direto	Sistema de arrefecimento à ar	Sistema de arrefecimento forçado	Sistema arrefecimento combinado	Sistema c/ mudança de fase
Eficiência térmica	5	30	40	10	20	40	40
Qtd. de componentes	2	30	30	40	30	20	10
Peso do sistema	4	30	20	40	30	40	20
Custos	3	30	10	40	30	20	10
Impacto em packaging	2	30	10	30	30	30	30
Segurança	3	30	40	20	20	30	30
Total	-	570	510	530	490	610	480

Fonte: Autor


REFERÊNCIA

Legenda: Peso de 1 a 5
1: baixa importância
5: alta importância

Legenda: 10: muito pior que a referência
20: pior que a referência
30: segue a referência
40: supera a referência

Fonte: Autores.

Tabela 3 - Matriz de Confirmação

MATRIZ DE CONFIRMAÇÃO

Critérios	Peso	Sistema de arrefecimento combinado	Sistema de arrefecimento indireto	Sistema de arrefecimento direto	Sistema arrefecimento à ar	Sistema de arrefecimento forçado	Sistema c/ mudança de fase
Eficiência térmica	5	30	10	40	10	10	40
Qtd. de componentes	2	30	40	40	40	30	20
Peso do sistema	4	30	40	20	40	40	20
Custos	3	30	40	10	40	40	20
Impacto em packaging	2	30	30	10	30	30	30
Segurança	3	30	30	30	20	20	30
Total	-	570	560	500	530	510	530

Fonte: Autor


REFERÊNCIA

Legenda: Peso de 1 a 5
1: baixa importância
5: alta importância

Legenda: 10: muito pior que a referência
20: pior que a referência
30: segue a referência
40: supera a referência

Fonte: Autores.

Após análise das Tabelas 2 e 3 acima, foi possível concluir qual caminho seria mais interessante seguir para resolução do problema. Inicialmente a referência escolhida foi o sistema de arrefecimento indireto, por ser o mais comumente usado nos veículos atuais, e, após a atribuição de notas, o melhor sistema para servir como base para o projeto foi o sistema de arrefecimento combinado.

Já na Matriz de Confirmação, a nova referência se torna o sistema de arrefecimento combinado, cuja nota total supera as outras, confirmando a escolha feita inicialmente.

Além das opções a serem analisadas, outra parte importante são os critérios escolhidos e seus respectivos pesos, pois estes serão os fatores de comparação em relação à referência. No caso do Projeto *Jotun*, os critérios escolhidos foram eficiência térmica com peso 5, quantidade de componentes com peso 2, peso do sistema com peso 4, custos com peso 3, impacto em *packaging* com peso 2 e a segurança com peso 3. A escolha de tais critérios e seus respectivos pesos foi representada abaixo:

- a) **Eficiência térmica:** Em um sistema de arrefecimento, a eficiência térmica é fator de elevada importância, pois é a partir dela que é possível analisar se o *powertrain* do veículo está sendo corretamente resfriado, se há elevada perda energética e outros fatores não tão óbvios, como vida útil dos componentes resfriados por esse sistema. Por esses motivos e pelo fato do projeto ser fundamentado em otimização do sistema de arrefecimento de veículos elétricos, esse critério possui o maior peso 5;
- b) **Quantidade de componentes:** Que se interliga ao próximo, abordando o quão complexo o sistema realmente é, quais componentes possuem mais de uma função específica, se há necessidade de vários componentes de fixação etc. Neste caso, como a engenharia atua ativamente na melhoria contínua de todos os componentes para que realizem várias funções ao mesmo tempo, o peso 2 foi definido pois a importância não é de grande relevância;
- c) **Peso do sistema:** Enquanto um aumento na quantidade de componentes não tem relação direta com um aumento na complexidade do sistema, este possui impacto direto no peso do sistema, que é fator limitante para a eficiência do veículo, pois como não haverá alteração no sistema de *powertrain*, haverá uma maior massa para ser movida com a mesma potência, o que força o sistema de propulsão a trabalhar em um estado mais de maior carga e esforço, diminuindo a eficiência do sistema. Devido a esse motivo extremamente importante, o peso 4 foi atribuído a esse critério;
- d) **Custos:** Como em todo projeto, um orçamento que não seja estratosférico é algo almejavél por todas as empresas que visam uma redução de custos. No entanto, um sistema de arrefecimento, devido à sua elevada responsabilidade pela saúde do sistema de *powertrain*, seus componentes e pela sua interligação com outros sistemas internos do veículo, não possui um custo relativamente baixo em comparação a outros sistemas. Concomitantemente a esse fato, cabe

à engenharia desenvolver componentes e sistemas que não sejam exageradamente custosos, o que poderia acarretar a inutilização dos mesmos devido à existência de outros componentes de menor custo. Com esses dois argumentos, e sendo um fator limitante para qualquer projeto, foi dado o peso 3 para os custos.

- e) **Impacto em *packaging*:** Como a proposta de otimização do sistema pode contemplar mudanças no radiador, na tubulação, nas válvulas e no posicionamento geral dos componentes desse sistema, é importante considerar o impacto que tais mudanças podem ter em *packaging*. O ideal é ter o menor impacto possível para que o foco do desenvolvimento esteja no sistema de arrefecimento em si e não em eventuais ajustes na arquitetura do veículo, que resultaria em um projeto muito maior do que o esperado. Entretanto, quando analisados os demais critérios da matriz, esse não é um dos que teriam maior probabilidade de impossibilitar o projeto, por isso o peso 2.
- f) **Segurança:** Como todo sistema do veículo, a segurança é algo sempre visto com um olhar diferenciado e mais atento, pois vidas podem estar em risco caso haja algum erro de cálculo, erro humano etc. No caso do sistema de arrefecimento, não há grandes riscos de vida para os ocupantes do veículo, a não ser em casos muito extremos. Como há sempre a preocupação com o bem-estar e vida dos ocupantes do veículo e, mesmo o sistema de arrefecimento não oferecendo praticamente nenhum risco a estes, foi atrelado peso 3 ao quesito segurança.

3.5.1 Vantagens e desvantagens do sistema

Considerando o sistema em série, baseado no arrefecimento do Fórmula E, tem-se os seguintes pontos.

Como vantagens, podemos trazer:

- a) Compacto, o que acarreta menor mudança de *package*;
- b) Redução do peso do radiador devido a menor necessidade da troca de calor causada pela separação dos sistemas em radiador-bateria-radiador e radiador-motor-inversor-radiador;

- c) Troca de calor mais eficiente devido a radiadores dedicados para o motor elétrico e o inversor.

Como desvantagens, podemos enumerar:

- a) Preço alto por ser baseado em um sistema implementado na Fórmula E;
- b) Complexidade do sistema (manutenção, montagem etc.);
- c) Mais componentes quando comparado com um sistema refrigerado a ar.

4 FERRAMENTAS DE ENGENHARIA

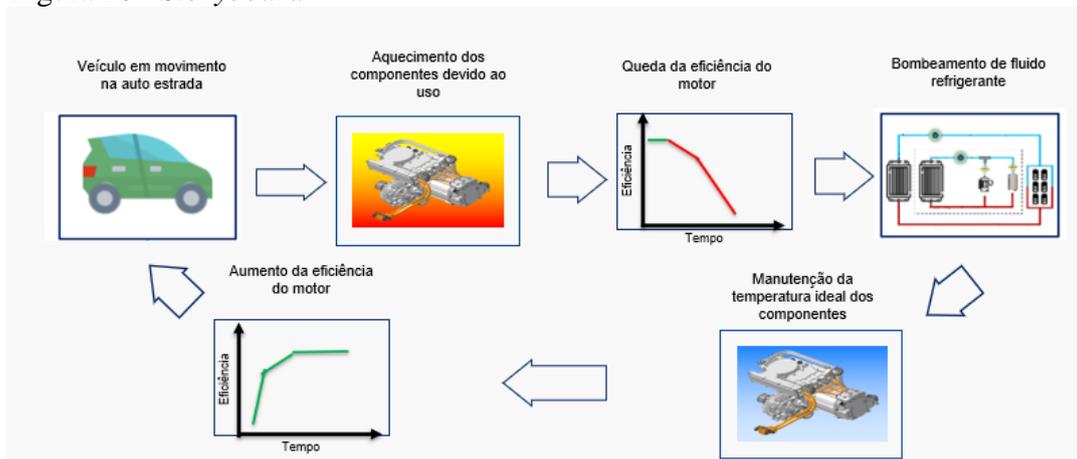
Durante o desenvolvimento do projeto e para orientar o seu direcionamento, foram utilizadas diversas ferramentas de engenharia, tais como: *Storyboard*, *Boundary Diagram*, *P-Diagram*, *SFMEA (Service Failure Mode and Effect Analysis)*, análise de valor, *WOIS (Widerspruchorientierte Innovationsstrategie)*, etc., fornecendo uma melhor visualização e entendimento de como os sistemas funcionam e se relacionam.

4.1 STORYBOARD

A ferramenta conhecida como *Storyboard* consiste em uma simplificação de um sistema estudado, de modo a mostrá-lo de maneira rápida e direta, frisando as funções dos componentes isoladamente, bem como a correlação dos componentes dentro do sistema.

A utilização desta ferramenta proporciona a vantagem de sintetizar o assunto proposto e o sistema estudado de modo a facilitar o entendimento destes por qualquer um que esteja vendo.

Figura 10 - *Storyboard*



Fonte: Autores.

Como representado na Figura 10 acima, podemos observar que para que entendamos o funcionamento e a problematização do projeto precisamos que o veículo esteja em movimento, pois assim os componentes elétricos e mecânicos do veículo começaram a trabalhar e assim gerarão calor, que por sua vez, começarão a perder eficiência, pois devido a não trabalharem com sua temperatura ideal perdem energia na forma de calor afetando o motor e o veículo no geral, logo para que este problema seja

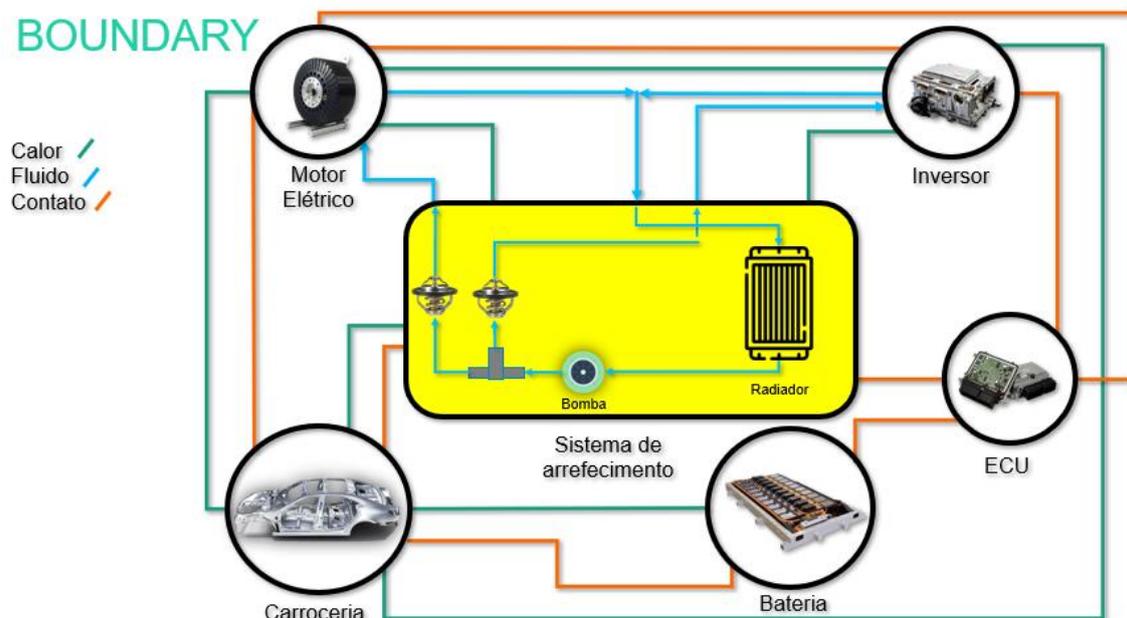
solucionado, o sistema de arrefecimento se torna necessário, pois ele é responsável por manter a temperatura dos sistemas ideal controlando assim a vazão e a temperatura do fluído para que, ao chegar em seu destino, o fluído de arrefecimento possa trocar o calor necessário para permitir que os componentes trabalhem de forma ideal, consequentemente vemos um aumento na eficiência do motor, o que irá auxiliar o veículo para que aumente sua eficiência global, aumentando sua autonomia.

4.2 BOUNDARY DIAGRAM

O *boundary diagram* é uma ferramenta gráfica utilizada para ilustrar o funcionamento do sistema, focando em como os componentes dentro do sistema de arrefecimento se relacionam entre si, bem como nas interfaces entre esses componentes/sistema de arrefecimento e os demais subsistemas/ambientes do veículo.

Assim, o *boundary diagram* foi construído da seguinte maneira: primeiramente, identificando os elementos principais do sistema em estudo (bomba, radiador e válvulas), depois ilustrando como eles interagem entre si e, por último, como eles devem interagir com os sistemas de fora.

Figura 11- *Boundary Diagram*



Fonte: Autores.

Observado na Figura 11 acima, o resultado. O radiador, a bomba e as válvulas foram escolhidos como os elementos principais no sistema de arrefecimento por desempenharem um papel crítico na troca de calor: a bomba e as válvulas são

responsáveis pelo fluxo do fluido, enquanto o radiador é o componente que vai resfriar esse fluido. Considerando as características e ação combinadas desses três componentes, como no número de passes do trocador de calor, a velocidade com que o fluido é bombeado e com a abertura correta das válvulas, pode-se concluir que eles são encarregados pela maior parte da eficácia e eficiência da troca de calor.

Um exemplo das interações evidenciadas na figura acima é o fluido sendo bombeado e passando pelo radiador, onde vai ser resfriado, e depois trocando calor com o inversor, que por sua vez está em contato com a *Eletronic Control Unit* (ECU). A ECU também está em contato com a bateria do veículo, que está em contato com a carroceria.

Essa ferramenta também serve como base para o desenvolvimento das ferramentas que serão apresentadas a seguir, como *SFMEA* e *P-Diagram*.

4.3 ANÁLISE DE VALOR

A análise de valor é uma ferramenta utilizada para explorar novos conceitos e definir suas arquiteturas, assim promovendo as funções necessárias ao menor custo evitando o desperdício.

Tabela 4 - Componentes x Função

COMPONENTE		FUNÇÃO
1	Radiador	Trocar calor
		Aumentar o peso
2	Ventoinha	Promover fluxo de ar
		Emitir som
		Aumentar peso
3	Tubos	Transportar o fluido
		Trocar calor
		Isolar o sistema
4	Líquido arrefecimento	Evitar desgaste térmico
		Trocar calor
		Prevenir bolhas
		Lubrificar componentes
5	Motor elétrico	Transformar energia
		Gerar calor
		Aumentar o peso
		Consumir energia
6	Inversor	Transformar corrente
		Gerar calor
		Aumentar o peso
		Consumir energia
7	Válvula Controle	Controle temperatura
		Controle de Vazão
		Consumir energia
8	Bomba d' água	Pressurizar sistema
		Promover fluxo
		Consumir energia

Fonte: Autores.

O grupo realizou a divisão dos componentes e suas respectivas funções segundo a Tabela 4 acima. Após definidas as funções dos componentes o grupo as classificou em:

- a) Função básica (B), a principal função do sistema;
- b) Função Secundária (S), que serve como suporte para a função Básica;
- c) Relevante (+), funções de maior importância dentro do sistema;
- d) Irrelevante (0), funções com baixa importância;
- e) Indesejável (-), possuem efeito colateral de algum componente;
- f) Uso (U), função que desempenha um papel dentro do sistema;
- g) Estética (E), utilizado apenas como design.

Após a classificação feita, com os critérios explicados acima, foi necessário a classificação das funções do sistema:

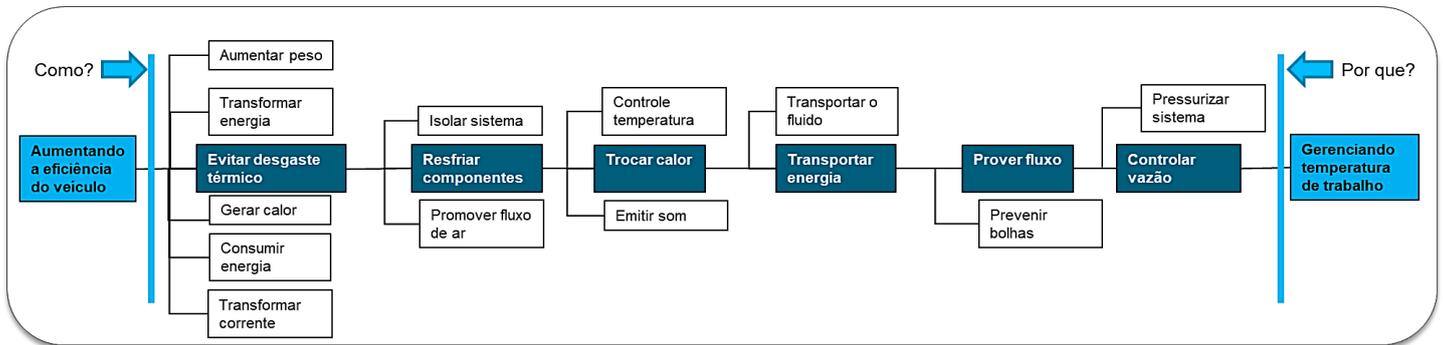
Tabela 5 - Classificação das funções

FUNÇÃO	CLASSIFICAÇÃO		
	B/S	“+0/-”	U/E
Trocar calor	B	(+)	U
Promover fluxo de ar	S	(+)	U
Transportar energia	S	0	U
Gerar calor	S	(-)	U
Transformar corrente	S	0	U
Controle temperatura	S	0	U
Controle de vazão	S	(+)	U
Promover fluxo	S	0	U
Pressurizar sistema	S	(+)	U
Transportar o fluido	S	0	U
Aumentar o peso	S	(-)	U
Transformar energia	S	0	U
Emitir som	S	(-)	U
Evitar desgaste térmico	S	(+)	U
Isolar sistema	S	0	U
Prevenir Bolhas	S	0	U
Consumir energia	S	(-)	U

Fonte: Autores.

Definida a classificação de cada função na Tabela 5, foi desenvolvida a ferramenta FAST – *Function Analysis System Technique*, que é uma técnica para desenvolver uma representação de como as funções se relacionam entre elas, baseando-se em responder sempre o “Porque” e o “Como”. A importância dessa ferramenta é demonstrar os passos que a solução precisa realizar, sem que falte, ou sobre alguma função dentro do sistema.

Figura 12 - Representação da ferramenta FAST



Fonte: Autores.

O objetivo inicial é o aumento de eficiência do veículo. Com o *FAST*, representado na Figura 12, podemos seguir a partir do caminho principal da esquerda para a direita do sistema, assim respondendo como o grupo fará para alcançar o objetivo inicial.

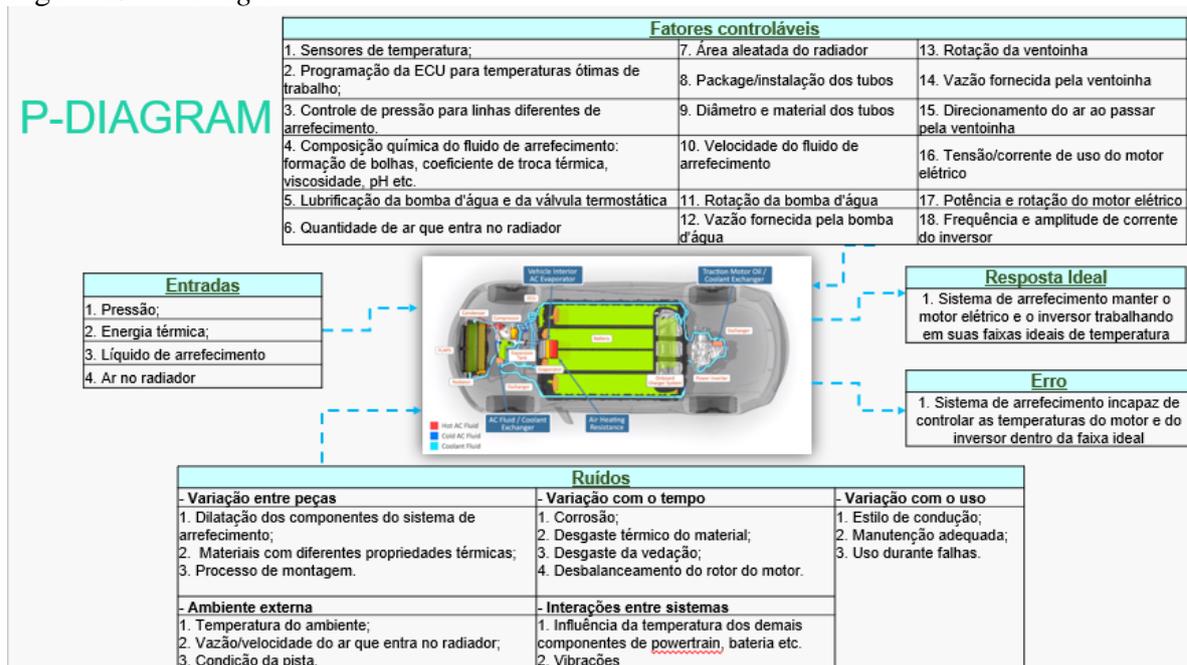
Podemos concluir que, com a análise de valor, cada componente tem sua devida importância dentro do sistema escolhido pelo grupo, evitando desperdícios e falta de qualquer componente, com o *Fast* somos capazes de enxergar todas as funções se conversando, mostrando o propósito de cada uma dentro da proposta do grupo, qual seja, “Aumentar a eficiência energética”, até o como “Gerenciando temperatura de trabalho”.

4.4 P-DIAGRAM

O *P-diagram* é a ferramenta utilizada para analisar todos os fatores de controle do projeto, que são as variáveis que podem ser controladas e programadas no desenvolvimento e no uso do sistema, mas principalmente é o que permite analisar todos os possíveis estados de erro.

Além disso, como *input* tem-se as grandezas necessárias para o projeto, e como *output* o objetivo deste.

Figura 13 - P-Diagram



Fonte: Autores.

Após a análise da ferramenta representada pela Figura 13, foi concluído que um sistema de arrefecimento incapaz de controlar as temperaturas do motor e do inversor pode trazer problemas ao veículo por completo, resultando em uma diminuição de sua eficiência global, de sua autonomia e da vida útil dos componentes presentes no sistema, portanto, como resposta ideal e desejada pelo grupo, temos o contrário do citado anteriormente. Sendo assim, para que o veículo seja menos afetado e trabalhe da forma correta, devemos assegurar que haja um sistema de arrefecimento e este seja capaz de controlar as temperaturas do motor e do inversor.

4.5 FMEA

O *FMEA - Failure Mode and Effect Analysis*, é uma das ferramentas mais importantes para o entendimento de como o sistema funciona, uma vez que ela reconhece todos os potenciais modos de falha e seus consequentes efeitos. Aos modos de falha são associados riscos, severidade, probabilidade de ocorrência e detecção, bem como as ações recomendadas para prevenção e correção de tais falhas e seus efeitos.

O *FMEA* pode ser feito com diversos focos: produto, processo, design, sistema etc. No caso do Projeto *Jotun*, o *FMEA* foi feito com base no sistema, já que o sistema de

arrefecimento engloba diversos componentes e depende da boa integração e funcionamento de todos eles para ter um resultado satisfatório.

Representado na tabela abaixo está um trecho do *SFMEA* desenvolvido para o *Jotun*¹, sendo que os componentes mais críticos são os tubos, que se não transportarem o fluido com a vazão adequada, mantendo o sistema isolado, podem ocasionar diversas falhas.

Tabela 6 - Trecho do *SFMEA* desenvolvido pelo grupo

Item	Function	Requirement	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Severity	Classification	Potential Cause(s) of Failure	Current Control Preventive	Occurrence	Current Controls Detective	Detection	R P N	Recommended Action(s)	Responsibility
Tubos	Transportar o fluido	Levar o fluido ao radiador para ser resfriado e transportar ao sistema de arrefecimento na temperatura ideal de cada componente	Possíveis trinças, furos que propiciam o vazamento do fluido	Impedir a troca de calor impactando a vida útil dos componentes eletrônicos	8	Crítico	Craquelar o tubo devido a variação de temperatura constante	Utilização de material com maior resistência à fadiga térmica	7	Utilização de corantes sinalizadores da vida útil da tubulação, afim de mostrar visualmente ao condutor a necessidade de troca dos tubos	8	448	Substituição do(s) tubo(s) defeituoso(s)	Grupo Jotun
				Diminuição da troca de calor	7	Grave						392		Grupo Jotun
	Impedir a entrada de ar no sistema	Furo ou trinca antes da bomba, possibilitando a entrada de ar no sistema	Diminuição da troca de calor	7	Grave	392						Grupo Jotun		
			Degradação da bomba responsável por pressurizar o fluido	6	Significativo	336						Grupo Jotun		
	Isolar o sistema	Garantir a vedação do sistema	Vazamentos de fluido nas junções	Diminuição da troca de calor	7	Grave	Corrosão pela falta de aditivos ou uso de aditivos impróprios no fluido de arrefecimento	Orientações quanto ao uso dos aditivos adequados	1	Realização do teste hidrostático para averiguar a possibilidade de vazamento	2	14	Seguir as normas ABNT NBR 1307 (aditivos para arrefecimento) e ABNT NBR 14261 (solução arrefecedora)	Grupo Jotun
				Degradação da bomba	6	Significativo						12		Grupo Jotun

Fonte: Autores.

De acordo com a representação da Tabela 6, pode-se observar que a maioria das falhas do sistema de arrefecimento não afetam apenas o sistema em si, mas também podem danificar vários outros subsistemas do veículo, estando em contato direto ou indireto com os componentes do arrefecimento, explicitando os detalhes de tais falhas e, assim, validando o que foi estudado nas demais ferramentas, principalmente o *P-Diagram* e *Boundary Diagram*.

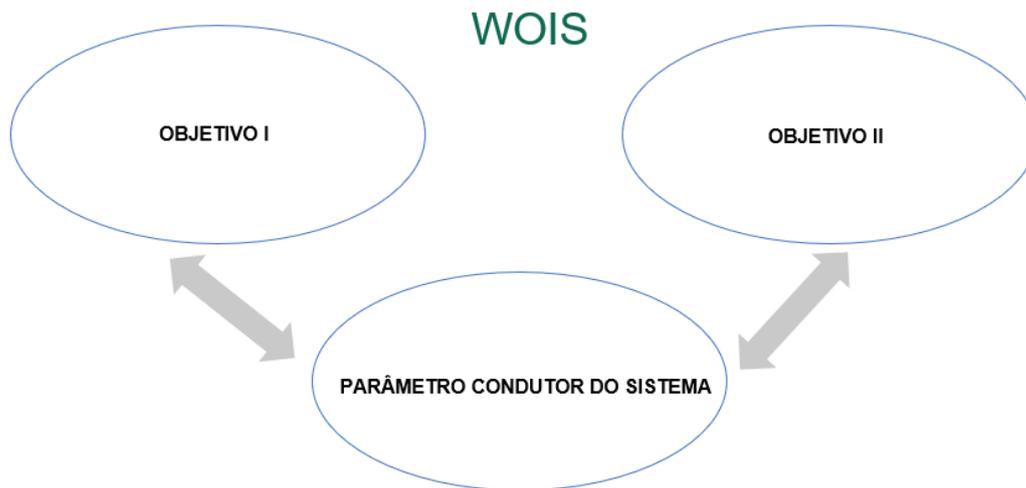
4.6 WOIS

Para auxiliar a tomada de decisão do grupo, foi utilizada a ferramenta *WOIS* - *Widerspruchorientierte Innovationsstrategie*, que traduzida significa Estratégia de Inovação Orientada pela Contradição, a qual é uma ferramenta que fornece uma solução para desafios contraditórios, o que significa que para que o projeto seja bem desenvolvido há alguns requisitos/objetivos que devem ser atingidos, no entanto alguns desses objetivos

¹ Cf. o *SFMEA* completo que está disponível no Apêndice E.

se chocam por trazerem necessidades distintas, e com essa ferramenta tentaremos solucionar estes problemas.

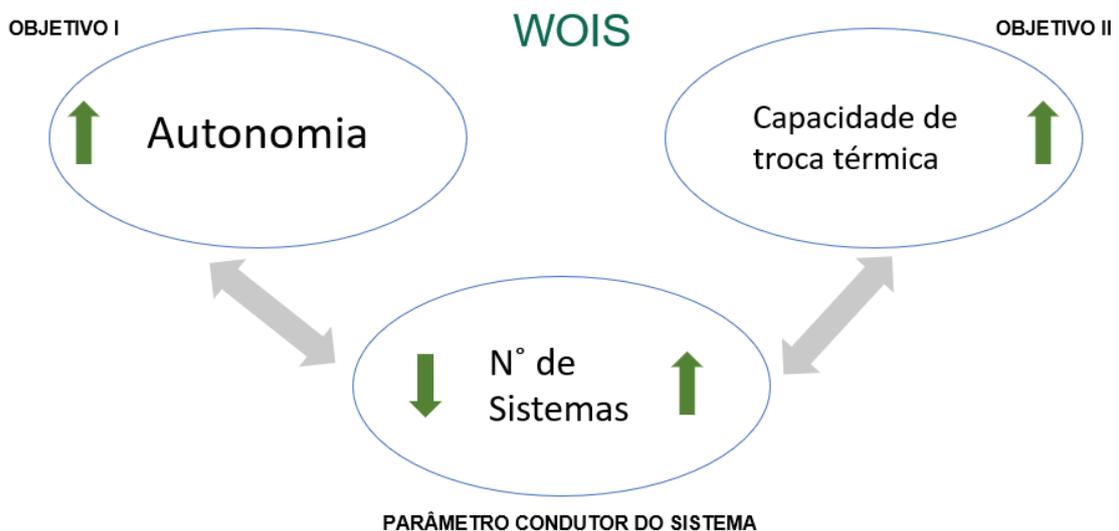
Figura 14 - Representação do *WOIS*



Fonte: Autores.

Como vemos na Figura 14, analisaremos dois objetivos que são influenciados por um parâmetro condutor do sistema, e com isso poderemos criar soluções para tal situação.

Figura 15 - *WOIS* do projeto



Fonte: Autores.

Portanto, como vemos na Figura 15, o número de sistemas no nosso veículo interfere em ambos os objetivos, sendo que é necessário aumentar o número de sistemas para melhorar a capacidade térmica, porém com o aumento do número de sistemas o peso será aumentado e, com isso, a autonomia do veículo diminui. Então, com o uso da

ferramenta, o grupo entendeu que para solucionar este problema, deverá ser adicionado sistemas ao veículo para melhorar a capacidade térmica, que por consequência melhorará a eficiência energética dele e, com isso, sua autonomia, mostrando assim que a solução proposta pelo grupo anteriormente é válida e correta.

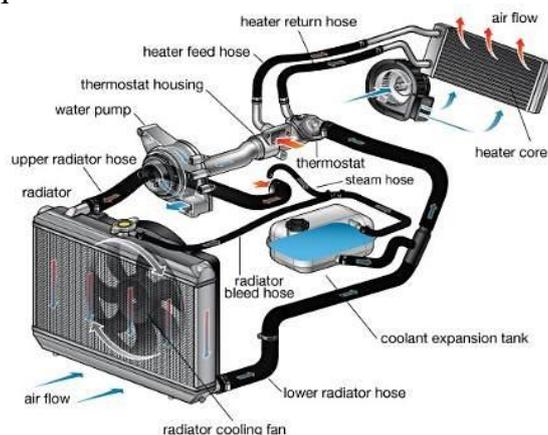
5 CONCEITO DO SISTEMA

O sistema de arrefecimento baseia-se em manutenção de temperaturas dos componentes constituintes do *powertrain* do veículo que, quando acionados, apresentam um aumento de temperatura, por conta de atritos internos e por Efeito Joule. Este aquecimento, se analisado a longo prazo, pode prejudicar o funcionamento dos componentes, ocasionando quedas significativas na eficiência energética e na vida útil das peças e do sistema de *powertrain*.

A função do sistema de arrefecimento, portanto, é fazer com que os componentes trabalhem, na maior parte do tempo, em suas temperaturas ideais, resfriando-os com a utilização de um líquido refrigerante, que é impulsionado por uma bomba hidráulica, circulando ao redor, ou por cavidades dos componentes, retirando calor por meio de radiação, convecção e condução. Com isso, o líquido aumenta sua temperatura e é resfriado na serpentina do radiador, finalizando seu percurso. O radiador nada mais é que uma estrutura metálica aletada, com uma serpentina interna, que diminui a temperatura de saída do fluido de arrefecimento por meio da troca de calor com o ar externo ao veículo.

As aletas por sua vez possuem a função de aumentar a superfície de troca de calor e, conseqüentemente, aumentam a eficiência de troca térmica do radiador.

Figura 16 - Esquema do sistema de arrefecimento de veículo a combustão



Fonte: (SISTEMA..., 2020).

5.1 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE ARREFECIMENTO

O sistema de arrefecimento do grupo fundamenta-se no modelo combinado, utilizado na Fórmula E, categoria elétrica derivada da Fórmula 1. Em suma, este sistema

diferencia-se dos outros por resfriar o motor elétrico e o inversor de corrente separadamente das baterias, logo, trata-se de dois sistemas de arrefecimento dedicados que, combinados, resfriam o conjunto de *powertrain* do veículo.

A escolha deste sistema em específico se dá ao fato de os componentes possuírem temperaturas ideais de trabalho divergentes, fazendo com que um sistema de arrefecimento único para as peças apresentadas anteriormente seja ineficiente, visto que resfriá-los de maneira igualitária poderia aumentar a eficiência de um deles, enquanto o outro poderia ter sua eficiência drasticamente afetada.

Após a escolha do sistema modelo, as dúvidas do grupo baseavam-se em algumas questões, apresentadas abaixo:

- a) Visto que o sistema combinado possui o maior valor agregado, como torná-lo viável para uso em veículos rodoviários e comerciais?;
- b) Como será a disposição dos componentes internos, tubulação, conexões, sistemas de regulação e sistemas auxiliares?;
- c) A troca de calor dos componentes de um veículo rodoviário justifica a escolha de um sistema de elevada tecnologia e performance como o sistema combinado?.

Estas perguntas modelaram as discussões e escolhas feitas pelo grupo, tanto em cálculos de troca de calor, disposição de peças e componentes, quanto em possíveis alterações a serem realizadas no sistema de arrefecimento combinado para que se tornasse viável em veículos de passeio.

5.1.1 Sumário do sistema de arrefecimento

Os componentes principais do sistema de arrefecimento combinado são a bomba d'água, radiador, válvula de controle, líquido de arrefecimento e tubulação, que são utilizados em conjunto para manter o motor elétrico e o inversor de frequência em suas temperaturas ideais de trabalho pela maior parte do tempo de uso:

- a) A bomba d'água é um componente composto por uma carcaça metálica com uma hélice interna, que, ao girar, impulsiona o fluido de arrefecimento por todo o sistema com pressão e velocidade adequadas para que haja a troca de calor suficiente entre componentes e o fluido. Esta geralmente está

posicionada logo após a saída do fluido do radiador, para que haja a mínima perda de energia do fluido durante o trajeto;

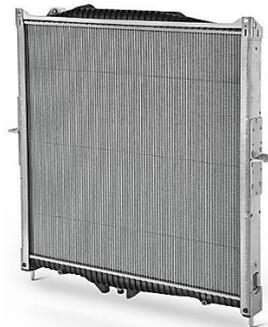
Figura 17 - Bomba d`água BMW



Fonte: RT CAR IMPORT, 2021.

- b) O radiador é uma estrutura metálica composto por uma serpentina para passagem do líquido de arrefecimento e centenas de aletas, que possuem a função de aumentar a área de troca de calor entre ar externo e o líquido, para que este consiga trocar calor de maneira eficiente com os componentes em cada uma de suas passagens por estes. Possui a função de trocar calor entre líquido de arrefecimento e ar externo;

Figura 18 - Radiador utilizado nos caminhões VOLVO



Fonte: VOLVO PEÇAS, 2021.

- c) A válvula de controle possui a função de regular a passagem de líquido de arrefecimento pelo sistema. Utilizada no veículo a combustão, a válvula termostática é a responsável por auxiliar o controle de temperatura no motor por meio de uma cera expansiva de dilatação específica. Quando o motor é ligado, a válvula permanece fechada e, conforme há o aquecimento dos componentes e conseqüente elevação da temperatura do veículo, a válvula se abre e há a integração entre sistema de arrefecimento e sistema de *powertrain*;

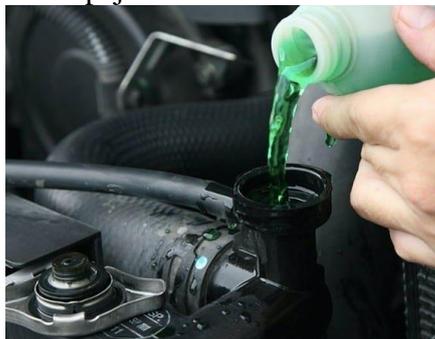
Figura 19 - Válvula de controle



Fonte: ENGEVEL, 2021.

- d) O líquido de arrefecimento é componente crucial em qualquer sistema de arrefecimento, pois é ele que realiza a troca de calor com o componente a ser aquecido. Este líquido possui características especificadas pelo fabricante (como viscosidade específica, coeficiente de troca térmica, ponto de ebulição entre outros) para que a troca de calor ocorra da maneira mais otimizada possível. Devido a esse fato, durante as trocas de óleo lubrificante, é necessário haver a confirmação de que o novo líquido possui as mesmas características definidas pelo fabricante;

Figura 20 - Despejamento de fluido de arrefecimento



Fonte: LOBO, 2019.

- e) As mangueiras e a tubulação, geralmente feitos com materiais plásticos ou derivados de borracha (podendo também ser metálicos em alguns casos), cujo papel principal é manter o líquido de arrefecimento fluindo em seu interior mantendo as propriedades de pressão e velocidade que a bomba d'água impôs no fluido, além de conectar os diferentes componentes do sistema de arrefecimento aos componentes do *powertrain*.

Figura 21 - Mangueiras automotivas



Fonte: RUBBERFAST, 2021.

6 ENGENHARIA REVERSA

Atualmente, é muito baixa a probabilidade de encontrarmos algo que ainda “não exista” ou que, pelo menos, não tenha sido pensado ou estudado. Isso não quer dizer que essas ideias e objetos não devam continuar sendo estudados.

Ao contrário do que muitos acreditam, soluções existentes devem ser sempre reavaliadas, reestudadas e, se possível, melhoradas. Para que possamos realizar essa análise, existem diversas ferramentas, sendo uma delas a engenharia reversa.

Segundo Dickin, a engenharia reversa consiste em desenvolver novos produtos, peças e ferramentas realizando o estudo em cima de modelos e componentes existentes (*apud* JARDINI *et. al.*, 2011, p. 01). Dessa forma, podemos analisar pontos que possam ser melhorados, sendo eles tanto no produto em si quanto no processo, reduzindo tempos, custos e tornando o sistema produtivo mais ágil e flexível.

A ferramenta foi aplicada neste projeto a fim de compreender o funcionamento de todos os componentes que serão empregados no sistema *Jotun*.

6.1 MOTOR ELÉTRICO

O motor elétrico do *Toyota Prius* 2004, veículo base deste trabalho, é do tipo ímã permanente síncrono, no qual uma corrente elétrica AC passa pelas bobinas do estator, que faz com que o rotor rotacione e gere velocidade para o veículo. A variação dessa corrente faz com que a velocidade possa ser controlada.

Abaixo seguem as características desse motor:

- a) Tipo: Motor de ímã permanente síncrono (PMSM);
- b) Massa: 44,9 kg;
- c) Dimensões: Ø299 x 205 [mm];
- d) Material: Alumínio, cobre, poliéster, aço;
- e) Processo de fabricação: estampagem, fundição e usinagem;
- f) Fabricante: *Toyota*.

Figura 22 - Motor-gerador do *Toyota Prius* 2004



Fonte: ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2017, p. 13.

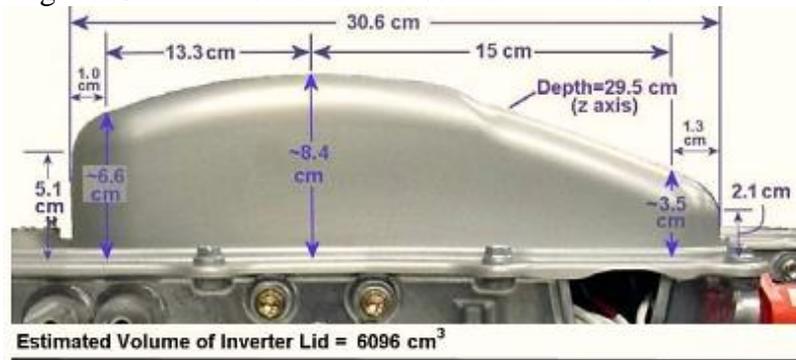
6.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência do veículo base possui a função de controlar o torque e a potência de motores elétricos por meio da variação de frequência e a tensão de entrada no motor.

Abaixo seguem as características desse inversor.

- a) Tipo: Inversor de frequência (VFD);
- b) Massa: 19,4 kg;
- c) Dimensões (C x L x H): 308 x 310 x 227 [mm];
- g) Material: Alumínio, cobre, aço;
- d) Processo de fabricação: estampagem, fundição e usinagem;
- e) Fabricante: *Toyota*.

Figura 23 - Dimensões do inversor do veículo base



Fonte: BURRESS *et. al.*, 2008, p. 82.

6.3 BOMBA D' ÁGUA

A bomba d'água do veículo base é uma bomba elétrica de 12 V de deslocamento positivo, com vazão máxima de 12 L/min. Essa bomba possui carcaça plástica com canais de entrada e saída do fluido e um suporte de metal para fixação da bomba no veículo.

Abaixo seguem as características dessa bomba:

- Tipo: bomba d'água elétrica 12 V de deslocamento positivo;
- Massa: 0,6 kg;
- Dimensões (C x L x H): 120 x 122 x 137 [mm];
- Material: plástico e alumínio;
- Processo de fabricação: conformação plástica e estampagem;
- Fabricante: *Toyota*.

Figura 24 - Bomba d'água *Toyota*



Fonte: AMAZON, 2021.

6.4 RADIADOR

O radiador do veículo base é constituído de uma caixa metálica aletada com uma serpentina passante ao longo do comprimento dele, com a função de resfriar o líquido de arrefecimento por meio da troca de calor com o ar externo.

Abaixo seguem as características desse radiador:

- a) Tipo: radiador automotivo metálico;
- b) Massa: 9,8 kg;
- c) Dimensões (C x L x H): 840 x 470 x 38 [mm];
- d) Material: alumínio;
- e) Processo de produção: conformação e estampagem;
- f) Fabricante: *Perfect Fit*.

Figura 25 - Radiador *Toyota Prius*

Fonte: EBAY, 2021.

6.5 VÁLVULA TERMOSTÁTICA

A válvula termostática do veículo base opera a $82 \pm 2^\circ\text{C}$, com funcionamento baseado em um pino de respiro válvula vulcanizada.

Abaixo seguem as características dessa válvula.

- Tipo: válvula termostática por pino de respiro;
- Massa: 0,2 kg aproximadamente;
- Dimensões (A x D1 x d2): 35 x 56 x 30;
- Material: cera expansiva derivada de petróleo e inox;
- Processo de fabricação: estampagem;
- Fabricante: *MTE-THOMSON*.

Figura 26 - Válvula termostática *MTE-THOMSON*

VT424.82 NUM OEM
90916-03093 90916-03123 90916-03143

AURIS	1.4 D Diesel	07/	PRIUS	1.5	00/04
AVENSIS	2.0 D Diesel	99/03	RAV 4	2.0 D	01/
COROLLA	1.5	99/01	YARIS	1.3 1.6V	99/
	2.0 D	00/02		1.4, 1.5 D Diesel	01/
HI-ACE	2.0, 2.4, 2.7	89/98			
PREVIA	2.0	01/			

	P	E	F	V	D1	56
81 \pm 2 $^\circ$ C	x		x		d2	30
					A	35.0

0222



Fonte: MTE-THOMSON, 2014, p. 100.

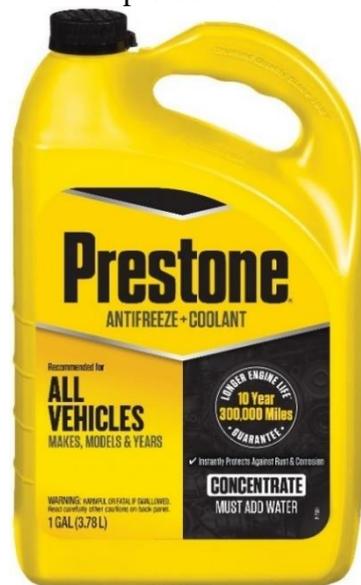
6.6 FLUIDO DE ARREFECIMENTO

O fluido de arrefecimento utilizado é constituído de 52% de mono etilenoglicol e 48% de água, com temperatura de trabalho média de 65°C, temperatura de ebulição de 197 °C e de fusão de -12,9 °C. As propriedades termodinâmicas do fluido influenciam diretamente na capacidade de troca térmica do sistema de arrefecimento, pois é por meio dessas capacidades que os componentes serão mantidos em suas temperaturas ideais de trabalho.

Abaixo seguem as características desse fluido:

- a) Tipo: fluido sintético com etilenoglicol/água na proporção (52/48);
- b) Massa específica média: 1,1132 g/cm³;
- c) Ponto de fusão: -12,9 °C;
- d) Ponto de ebulição: 197,3 °C.

Figura 27 - Exemplo de fluido de arrefecimento



Fonte: WALMART, 2021.

6.7 TUBULAÇÃO

A tubulação do sistema de arrefecimento é uma das partes mais importantes do sistema de arrefecimento, pois é a condutora do fluido por todo o sistema, com função de manter as propriedades do fluido em condições ideais de trabalho enquanto este circula ao redor e entre os componentes, resfriando-os e mantendo a eficiência do sistema sempre elevada.

Abaixo seguem as características da tubulação:

- a) Tipo: Tubulação automotiva do sistema de arrefecimento;
- b) Material: borracha, alumínio e/ou fibra sintética;
- c) Processo de fabricação: extrusão;
- d) Fabricante: *BLUE Print*.

Após o estudo e avaliação de cada componente por meio da engenharia reversa, foi possível traçar alguns paralelos entre este projeto acadêmico e os projetos conduzidos diariamente nas diferentes empresas dos mais variados segmentos de mercado.

A engenharia reversa não está presente somente nos grandes projetos conduzidos pelas empresas globais, mas também está em cada uma das referências adotadas e estudadas pelo grupo, pois essa ferramenta fez com que cada integrante analisasse a referência que estava utilizando e o conduziu a uma reflexão do gênero: “Após a análise dos parâmetros estabelecidos e estudo acerca do efeito destes no projeto, é possível obter certas conclusões. Caso os parâmetros utilizados tivessem sido outros, em condições diferentes, com equações e situações distintas, baseando-se em outros equacionamentos e métodos de resolução, ainda sim seria possível obter as mesmas conclusões? É possível utilizar um estudo já existente e elevá-lo a outro patamar de excelência e notoriedade em termos de engenharia, análise técnica e resultados obtidos?”.

Esse tipo de reflexão possui extrema importância, pois faz com que um estudo, um projeto ou uma ideia não se mantenham eternamente estacionários, como se fossem verdades absolutas e irrefutáveis. Pelo contrário, faz com que esses itens possuam uma dinâmica própria, pois constantemente serão foco de estudos posteriores que podem desmentir, validar ou aprimorá-los. Esses motivos são suficientes para essa técnica ser utilizada nas empresas que buscam excelência em seus produtos e serviços, pois analisam os lançamentos de seus concorrentes diretos e indiretos e, por meio de equipes disciplinadas e altamente qualificadas, conseguem tirar proveito das conclusões alcançadas e as utilizam para aperfeiçoarem ainda mais os seus próprios serviços e produtos, tudo isso por meio de uma competição acirrada e totalmente justa entre os concorrentes.

No caso do Projeto *Jotun*, a utilização dessa ferramenta mostrou-se eficaz a partir do momento em que foi necessária a realização de um estudo para o *Benchmarking* do Projeto *Jotun*, no qual foram analisadas diferentes propostas de sistemas de arrefecimento, cada qual com sua característica própria de funcionamento e aplicação.

Ao analisar todas as propostas e verificar por meio das Matrizes de Decisão e Confirmação qual dentre todas seria a base para o projeto, instintivamente era aplicada a Engenharia Reversa, pois o escopo do projeto prevê melhora do sistema de arrefecimento dos veículos elétricos e, ao utilizar algum projeto como base, é dada a ele a dinâmica referida anteriormente, elevando-o a outro patamar de excelência técnica e analítica.

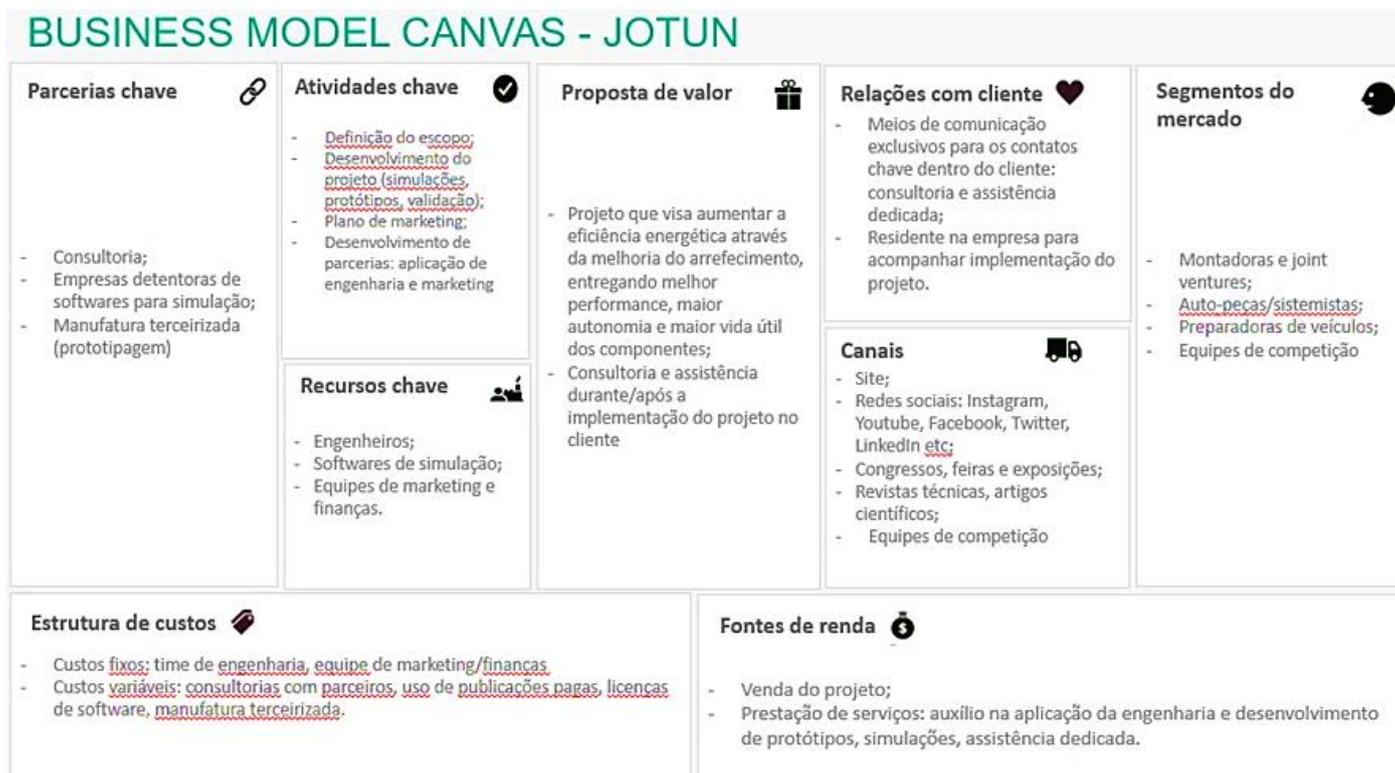
Em suma, caso a ferramenta não houvesse sido utilizada propriamente, o grupo corria sério risco de ter focado esforços e recursos em um projeto que poderia ser igualmente eficiente, mas que devido ao fato de ser inovador, há a tendência de ser rejeitado de imediato; ou ser inferior aos outros projetos apresentados no mercado atual, o que faria o Projeto *Jotun* não ser aceito em grandes empresas de engenharia e inovação, tornando-o inútil para o mercado.

7 BUSINESS MODEL CANVAS

O *Business Model Canvas* é a ferramenta usada para planejar um negócio. Por meio dela é possível definir o modelo de negócio, ou seja, é possível descobrir como estruturar todas as atividades necessárias para gerar valor aos clientes.

A grande vantagem dessa ferramenta é que ela permite sintetizar a ideia de negócio em apenas uma página, por ser uma técnica simples e rápida, que possibilita visualizar os aspectos estratégicos do projeto, garantindo praticidade e inovação. Em outras palavras, o *canvas* é um mapa visual que ajuda a analisar a viabilidade do empreendimento.

Figura 28 - Business Model Canvas



Fonte: Autores.

O *canvas* de negócios do grupo, representado pela Figura 28, foi feito com base na venda do projeto, com a seguinte proposta de valor: aumentar a eficiência energética através da melhoria do arrefecimento, entregando melhor performance, maior autonomia e maior vida útil dos componentes. Também se tem como meta agregar valor ao projeto ao fornecer consultoria e assistência para os clientes.

São eles: montadoras, *joint ventures*, autopeças, sistemistas, preparadoras de veículos e equipes de competição, que planejamos atrair por meio das redes sociais, do nosso site, congressos, feiras, exposições, revistas técnicas e artigos e pelas próprias equipes de competição. O relacionamento será através de meios de comunicação exclusivos, focando nos contatos chave e no residente dentro da empresa para acompanhar a implementação do projeto.

Para isso, são atividades essenciais: definição do escopo e desenvolvimento do projeto (considerando simulações, protótipos e validação), plano de *marketing* e desenvolvimento de parcerias para aplicação de engenharia e *marketing*, tendo como recursos chave os engenheiros, *softwares* para simulação e equipes de *marketing* e

finanças, bem como parcerias importantes com consultorias, empresas detentoras de *softwares* para simulação e manufatura terceirizada para prototipagem.

A estrutura de custos se divide entre custo fixos, contanto com os times de engenharia, *marketing* e finanças e custos variáveis, que seriam as consultorias, uso de publicações pagas, manufatura terceirizada e licenças para software.

Já a fonte de renda vem da venda do projeto e da prestação de serviços, com auxílio na aplicação da engenharia, desenvolvimento de protótipos e assistência dedicada.

8 FUNDAMENTO TEÓRICO

8.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para Kreith, Manglik e Bohn (2014), a energia será transferida sempre que houver um gradiente de temperatura dentro de um sistema ou cada vez que dois sistemas com diferentes temperaturas sejam colocados em contato. O processo pelo qual o transporte de energia acontece é chamado de transferência de calor: o calor é transferido de uma região de alta temperatura para uma de baixa, entretanto, esse movimento não pode ser medido ou observado diretamente, apesar de ser possível identificar e quantificar seus efeitos por meio de medições e análises.

Para tal é preciso entender que a transferência de calor ocorre por meio de três mecanismos: condução, radiação e convecção, sendo que desses, somente condução e radiação dependem do gradiente de temperatura para acontecer, enquanto a convecção também está intimamente ligada ao transporte mecânico de massa.

A condução, conforme Çengel e Ghajar, “caracteriza-se como a transferência de energia por meio das partículas mais energizadas da substância para as partículas menos energizadas e pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases” (ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p. 09). Nesse trabalho, será considerado a condutividade do material já determinado.

Para máquinas elétricas, como o motor e o inversor, a condução ocorre entre as partes sólidas.

Já a convecção é a transferência de calor por meio do fluido na presença do movimento da sua massa. A convecção pode ser classificada como convecção natural (ou livre) ou forçada, dependendo de como se inicia o movimento do fluido.

Na convecção natural, qualquer movimento de fluido é causado por meios naturais como o efeito empuxo, que se manifesta com fluidos quentes subindo e fluidos frios descendo. A convecção forçada, o fluido é forçado a escoar sobre a superfície ou dentro de um tubo por meios externos como uma bomba ou um ventilador.

E a radiação térmica é a em forma de ondas eletromagnéticas ou fótons que é emitida por uma superfície para seus arredores que estão mais frias.

O máximo de radiação que pode ser emitida é a mesma de um corpo negro que possui a emissividade igual a 1. Para outras superfícies a emissividade é uma medida de efetividade de radiação quando comparado com um corpo negro, e seu valor está em uma

faixa entre 0 e 1. Quando a convecção forçada é usada para a refrigeração do sistema, a radiação é normalmente descartada.

8.1.1 Trocador de calor

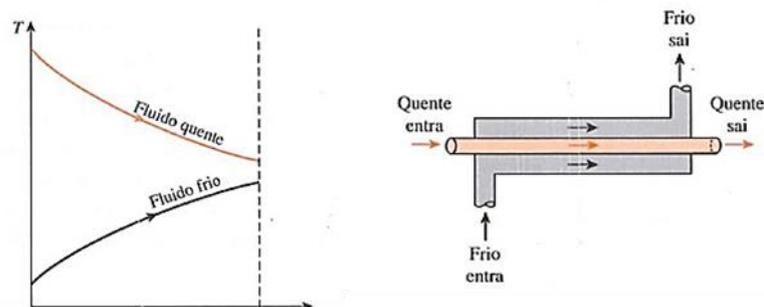
A transferência de calor nos trocadores de calor envolve convecção em cada fluido e troca de calor por condução através da parede dos tubos. Assim, como trabalhado no Yunus A. Çengel e Afshin J. Ghajar livro Transferência de Calor e Massa (2012), utilizaremos um coeficiente global de transferência de calor “U”. Apresentaremos os tipos de trocador de calor para então fazer a escolha adequada ao projeto.

8.1.1.1 Trocador de duplo tubo

Este é o mais simples trocador de calor. O fluido escoa entre dois tubos concêntricos, um dos fluidos escoa pelo tubo menor e outro escoa pelo tubo maior. Existem dois tipos de trocador de calor de duplo tubo: o trocador de escoamento paralelo e o de contracorrente.

No trocador de calor paralelo, o fluido quente e frio entra na mesma extremidade e avançam na mesma direção. Na imagem a seguir, mostraremos um exemplo de trocador de escoamento paralelo:

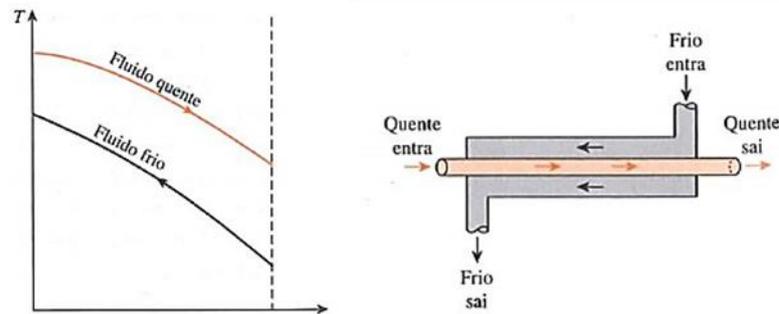
Figura 29 – Trocador de corrente paralela



Fonte: ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p .610.

No trocador de calor contracorrente, os fluidos escoam em direções opostas. Observe a seguir a imagem de um trocador contracorrente:

Figura 30 – Trocador contra-corrente

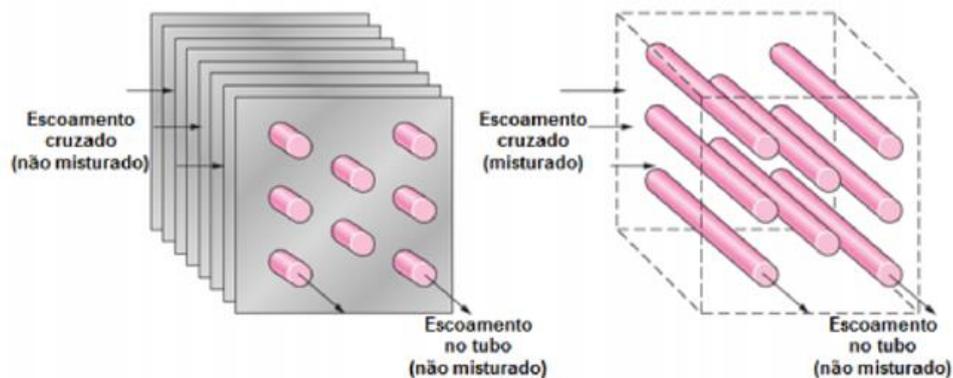


Fonte: ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p. 610.

Outro tipo de trocador de calor, e o mais relevante para o projeto, é o trocador classificado como compacto. Esse tipo de trocador de calor é projetado para permitir uma grande superfície de transferência de calor por unidade de volume. Quando maior for essa relação que chamaremos de β , maior será a superfície de contato e, conseqüentemente, a troca de calor será maior. Para um trocador de calor ser considerado como compacto, $\beta > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$. O radiador é um bom exemplo de trocador de calor compacto ($\beta \approx 1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$), trocador de calor de turbina a gás ($\beta \approx 6000 \text{ m}^2/\text{m}^3$) e o pulmão humano ($\beta \approx 20000 \text{ m}^2/\text{m}^3$).

Nos trocadores de calor compactos, os fluídos normalmente circulam perpendicularmente uns aos outros. Essa configuração é chamada de escoamento cruzado. Existem dois tipos de escoamento cruzado, o chamado com mistura e o sem mistura. No escoamento sem mistura, aletas restringem o movimento do fluido, fazendo-o passar necessariamente na perpendicular em relação ao outro fluído, como será mostrado no item (a) da próxima Figura 31. No escoamento com mistura, o fluido pode também se mover paralelamente ao outro fluido como mostrado no item (b).

Figura 31 – Trocador de fluxo cruzado



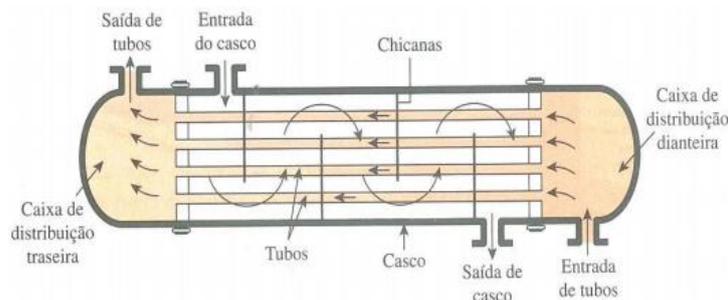
(a) Ambos os fluídos sem mistura

(b) Um fluido com mistura, um fluido sem mistura

Fonte: ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p. 611.

O tipo mais comum de trocador de calor é o de casco tubo. Neste tipo de trocador os tubos ficam condicionados no casco que possui um eixo paralelo. Por ser um trocador de grande porte – tamanho e peso, não é aplicado em aeronaves nem automóveis. Assim sendo, a teoria será comentada, entretanto não será aprofundada. A seguir, temos uma imagem ilustrativa de um trocador casco e tubo:

Figura 32 – Trocador casco e tubo.



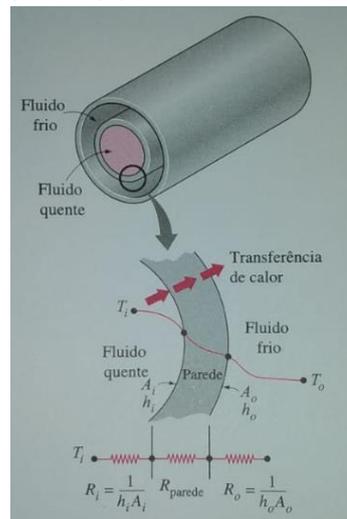
Fonte: ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p. 612.

8.1.2 Coeficiente global de transferência de calor

Como descrito nos exemplos anteriores, geralmente a troca de calor envolve dois fluidos e uma parede sólida. A transferência de calor ocorre por convecção para a parede e através da parede a troca de calor é por condução até que, por fim, a troca volta a acontecer por convecção para o outro fluido. A radiação também está presente, mas ela será incluída no coeficiente de troca de calor por convecção.

Conclui-se que a resistência térmica do processo é composta por três resistências: Duas de convecção e uma de condução. Temos que a resistência associada a convecção é dada por $R_x = \frac{1}{h_x A_x}$, onde h é o coeficiente de troca por convecção, A é a área e x pode assumir “i” que representa a parede interna e “o” que representa a parede externa do tubo interno. A resistência interna da parede é dada por $R_{parede} = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k L}$ onde k é o coeficiente de condutibilidade térmica do material e L é o comprimento do tubo. Veja a ilustração a seguir e, posteriormente, a resistência térmica total do sistema:

Figura 33 – Resistência térmica total



Fonte: ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p. 613.

$$R = R_{total} = R_i + R_{parede} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}$$

Para facilitar o entendimento das áreas, pode-se colocar que A_i e A_o são as áreas de separação de superfície molhada pelos fluidos interno e externo respectivamente. A combinação das resistências feita seguindo o caminho do fluido quente para o fluido frio facilita a resolução dos problemas. Com a resistência equivalente, podemos calcular a taxa da transferência de calor como:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta t}{R} = UA\Delta t = U_i A_i \Delta t = U_o A_o \Delta t$$

Onde U [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$] é o coeficiente global de transferência de calor. Repare que U tem a mesma unidade de h , cancelando o Δ temos que:

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{parede} + \frac{1}{h_o A_o}$$

Pode desprezar R_{parede} se a parede do tubo for pouco espessa e a condutividade térmica do seu material é elevado, o que acontece com frequência. Ainda se as áreas forem muito parecidas pode-se utilizar:

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

Vale comentar que o coeficiente global de transferência de calor é dominado pelo menor coeficiente de convecção, pois o inverso de um número grande é um número pequeno. Na prática se h_i for muito menor que h_o , U é aproximadamente h_i .

No caso quando o tubo é aletado a área da superfície de troca de calor passa a ser:

$$A_s = A_{total} = A_{aletado} + A_{n\grave{a}o\ aletado}$$

Deve-se levar em consideração que a aleta pode não ser isotérmica, assim devemos levar em consideração a eficiência térmica da aleta η para determinar a superfície efetiva da aleta, assim temos:

$$A_s = A_{total} = \eta_{aletado} A_{aletado} + A_{n\grave{a}o\ aletado}$$

8.1.3 Fator de incrustação

Com o tempo de uso, os trocadores de calor acumulam depósitos de partículas em sua superfície. Isso é chamado de incrustação e resulta numa diminuição da taxa da transferência de calor. Assim sendo, acrescentaremos uma resistência térmica introduzida pela incrustação chamada de R_f .

8.1.4 Radiador

Supondo que os fluídos troquem calor apenas entre eles, a primeira lei da termodinâmica diz que a taxa de transferência de calor é igual para o fluído frio se comparado ao fluído quente, logo temos:

$$\dot{m}_c c_{pc} (T_{c,saida} - T_{c,entrada}) = \dot{m}_h c_{ph} (T_{h,entrada} - T_{h,saida})$$

C e h significam fluídos frios e quentes, respectivamente:

$\dot{m}_h, \dot{m}_c =$ vazão mássica

$c_{pc}, c_{ph} =$ calores específicos

$T_{c,saída}, T_{h,saída} =$ temperaturas de saída

$T_{c,entrada}, T_{h,entrada} =$ temperaturas de entrada

Lembrando que a taxa de capacidade térmica é o produto da vazão mássica com o calor específico.

$$C_c = \dot{m}_c c_{pc}$$

$$C_h = \dot{m}_h c_{ph}$$

Segundo a Tabela 11-1 do livro de Transferência de Calor e Massa, de Çengel e de Ghajar (2012, p. 634), o coeficiente global de transferência de calor em um trocador de calor de água-ar em tubos aletados é de 30 a 60 W/m². °C.

8.1.4.1 Cálculos para radiador dedicado ao *powertrain*

Após análise da introdução teórica entre os membros do grupo, seria necessário dar início aos cálculos do radiador dedicado para arrefecer o motor elétrico, visto que o escopo do Projeto *Jotun* se baseia no modelo de Sistema de arrefecimento combinado, apresentado pelos veículos de competição da Fórmula E.

A razão de utilizar radiadores dedicados baseia-se no fato de que motor elétrico e inversor elétrico são componentes distintos que, mesmo interligados por suas funções primárias no sistema de *powertrain* do veículo, possuem características de funcionamento, temperaturas de trabalho, modo de operação, coeficientes térmicos, de dilatação e calor rejeitado diferentes um do outro, fato que torna necessária a aplicação de sistemas dedicados para atender às diferentes demandas desses componentes.

Para realização dos cálculos, foram utilizados os estudos realizados pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo Escola Politécnica (CARDOSO, 2011), bem como as anotações das aulas ministradas pelos Prof. Dr. Gabriel

Ângelo e Prof. Me. Francisco Lameiras Júnior, do Centro Universitário FEI (informação verbal)², além do estudo realizado por Jeff LaMarre, engenheiro mecânico da Universidade do Akron-EUA (LAMARRE, 2015) e pelos dados cedidos pelo Prof. Me. Marco Barreto³.

Segundo LaMarre (2015), no artigo *FSAE Electric Vehicle Cooling System Design*, há a necessidade de calcular a carga térmica produzida pelo motor elétrico do *Toyota Prius*, que será somada à carga térmica produzida pelo inversor elétrico do veículo para dimensionar o radiador de maneira correta.

No sistema de *cooling* dos veículos elétricos, o calor é transferido entre o powertrain, constituído de motor e inversor elétrico e o radiador. Para que esse sistema funcione de maneira correta, a taxa de calor transferida pelo powertrain para o radiador deve ser igual à taxa de calor transferida pelo ar na entrada do radiador e pelo fluido de arrefecimento. Esse calor transferido é o que, segundo LaMarre, corresponde à carga térmica.

O cálculo da carga térmica do motor depende da eficiência média do motor ($\eta_{\text{méd_motor}}$), calculada por média aritmética entre a menor e a maior eficiência apresentadas; da menor eficiência do inversor elétrico ($\eta_{\text{mín_inversor}}$) e da potência máxima disponível pelo motor elétrico ($P_{\text{máx_motor}}$) de 50 kW, segundo a equação abaixo:

$$\dot{Q}_{\text{motor}} = (1 - \eta_{\text{méd_motor}}) * (1 - \eta_{\text{mín_inversor}}) * P_{\text{máx_motor}}$$

Utilizando os dados de eficiência presentes no apêndice H, foi possível realizar a montagem da tabela abaixo, com as eficiências do motor elétrico frente diferentes temperaturas de funcionamento.

Tabela 7- Eficiência do motor elétrico do *Toyota Prius* 2004

Temperatura do motor elétrico [°C]	Eficiência máxima [%]	Eficiência mínima [%]	Eficiência média [%]
20	98,854	86,6287	92,741
70	98,826	86,359	92,593
120	98,781	86,052	92,417

Fonte: Autores.

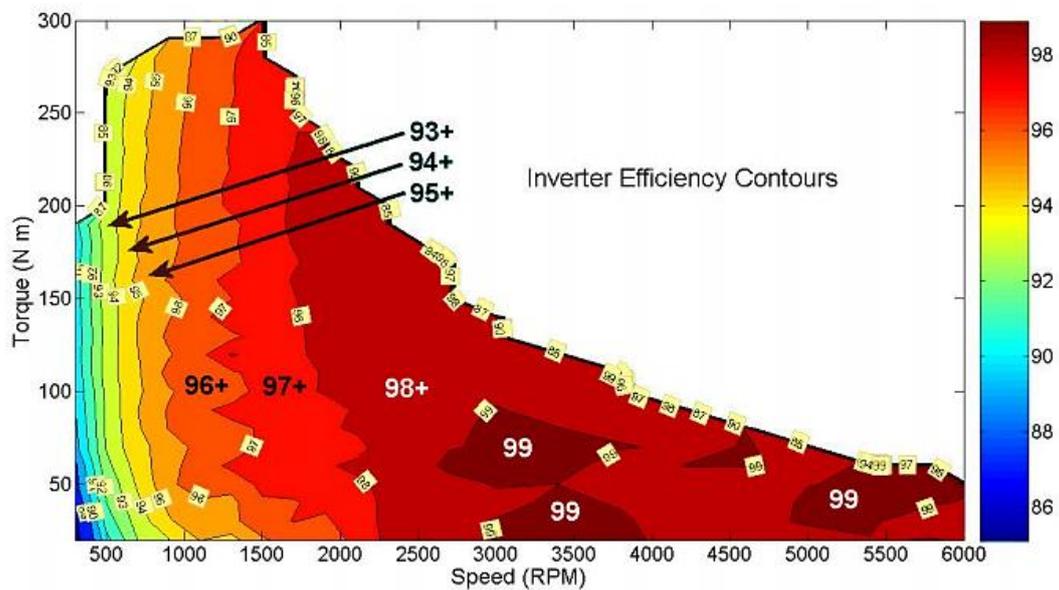
² Aulas ministradas pelos Profs. Dr. Gabriel Ângelo e Me. Francisco Lameiras Júnior, nas disciplinas Fundamentos de Transmissão de Calor (4º semestre) e Transmissão de Calor aplicada (5º semestre).

³ Cf. o Apêndice F

Ao analisar a tabela acima, nota-se que o motor trabalha com eficiências muito próximas, mesmo com aumentos de temperatura de 50°C subsequentes, o que confirma a alta eficiência dos componentes elétricos presentes no *powertrain* de veículos elétricos e híbridos atuais. Além disso, para a realização do cálculo acima, foi levado em consideração o caso mais crítico de funcionamento do motor, representado pela menor eficiência média, presente na temperatura de trabalho de 120°C.

Outro dado importante para o cálculo é a eficiência mínima do inversor do veículo. Tal dado é expresso pelo gráfico abaixo, possui valor mínimo de 88%.

Figura 34 - Eficiência do inversor



Fonte: STAUNTON, R. H. *et. al.*, 2006, p. 34.

Em posse de tais dados, é possível realizar o cálculo mencionado anteriormente:

$$\dot{Q}_{motor} = (1 - \eta_{méd_motor}) * (1 - \eta_{mín_inversor}) * P_{máx_motor}$$

$$\dot{Q}_{motor} = (1 - 0,92417) * (1 - 0,88) * 50.000 W = 9.336,5 W$$

Para os cálculos da carga térmica do inversor, o grupo tomou o caminho reverso, iniciando na potência do motor e retornando para o inversor de frequência. Nesse caso, foi considerada também a pior situação de eficiência para o motor e para o inversor, de modo a dimensionar o radiador para atender a pior atuação do *powertrain* possível.

Através de estudos de rodagem do Ciclo FTP75 via *software AVL Cruise*, é obtido que a eficiência mais baixa do motor elétrico é de 86,0515%. Como já é de conhecimento,

a potência do motor elétrico é reduzida devido ao efeito da eficiência do próprio motor, logo, a potência de saída do motor ($P_{saída_motor}$) pode ser equacionada por:

$$P_{saída_motor} = P_{entrada_motor} * \eta_{motor}$$

Nesse caso, para o dimensionamento do radiador, é tido que:

$$P_{saída_motor} = P_{entrada_motor} * \eta_{mín_motor}$$

$$50.000 = P_{entrada_motor} * 0,86515$$

$$P_{entrada_motor} = P_{saída_inversor} = 57.793,5 W$$

Como as perdas entre os componentes é praticamente nula, temos que $P_{entrada_motor} = P_{saída_inversor}$. No entanto, a $P_{saída_inversor}$ é inferior a potência de entrada no inversor ($P_{entrada_inversor}$), devido aos efeitos de perda por Efeito *Joule* principalmente, que são referenciados na eficiência do inversor ($\eta_{inversor}$).

Assim como no motor, temos que:

$$P_{saída_inversor} = P_{entrada_inversor} * \eta_{mín_inversor}$$

$$57.793,5 = P_{entrada_inversor} * 0,88$$

$$P_{entrada_inversor} = 65.674,4 W$$

Logo, a carga térmica do inversor é calculada como sendo a diferença entre a potência de entrada e a potência de saída do inversor, explicitada abaixo:

$$\dot{Q}_{inversor} = P_{entrada_inversor} - P_{saída_inversor} = P_{saída_inversor} * (1 - \eta_{mín_inversor})$$

$$\dot{Q}_{inversor} = (1 - 0,88) * 65.674,4$$

$$\dot{Q}_{inversor} = 7.880,9 W$$

De modo a suprimir possíveis erros de aproximação, arredondamento e dados escolhidos, o grupo decidiu utilizar um coeficiente de segurança para a carga térmica de 20%, de modo a dimensionar um radiador que consiga atender a esse aumento, mostrado abaixo pelo equacionamento:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{radiador} &= \dot{Q}_{inversor} * 1,2 = \dot{Q}_{motor} * 1,2 \\ \dot{Q}_{radiador_inversor} &= 7880,9 * 1,2 = 9457,1 W\end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{radiador_motor} = 1,2 * 9336,5 = 11.203,8 W$$

Inicialmente, o grupo utilizou as dimensões do radiador utilizado no veículo base e as dividiu por dois, pois trata-se de um radiador desenvolvido para atender às demandas de um veículo híbrido que, em comparação aos veículos elétricos atuais, possui uma rejeição de calor muito maior, sendo necessário um radiador maior do que o para veículos elétricos.

As dimensões utilizadas foram explicitadas na tabela abaixo.

Tabela 8 - Dimensões frontais do radiador adotado

Dimensões Radiador Motor Toyota Prius 2004		
Altura – H	235	mm
Comprimento – L	420	mm

Fonte: Autores.

O próximo passo foi calcular as dimensões para as aletas do sistema, bem como o número de tubos e dimensões deles. Para isso, foram adotados uma espessura média para a parede dos tubos, que deveria atender a condição de possuir dimensão praticamente desprezível para que fosse possível atender os requisitos da equação de determinação do coeficiente global de transferência de calor, o número de tubos passantes pelo radiador, bem como sua altura e comprimento; altura, largura e espessura das aletas, utilizando como base os estudos realizados no artigo “Análise e simulação do funcionamento de trocadores de calor sob condição de entupimento”, de André Scaranto Cardoso (2011).

As dimensões podem ser vistas na tabela abaixo:

Tabela 9 - Dimensões adotadas para tubulação e das aletas do radiador do motor

Dimensões tubulação e aletas do radiador para motor		
Nº de tubos do radiador - N	62	
Altura dos tubos – ht	2	Mm
Comprimento dos tubos - lt	50	Mm
Espessura dos tubos – tt	0,15	Mm
Altura das aletas – há	1,5	Mm
Comprimento das aletas - la	1,5	Mm
Espessura das aletas – ta	0,2	Mm

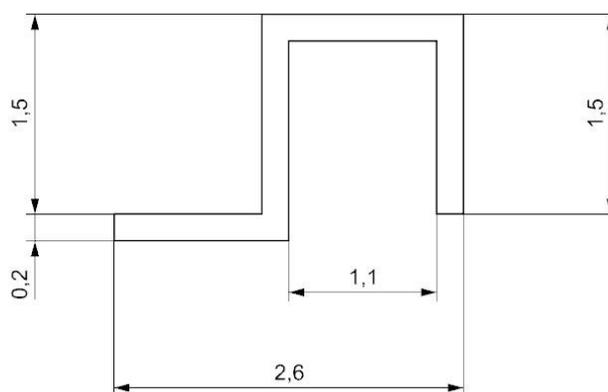
Fonte: Autores

Vale ressaltar que os tubos não possuem seção circular, mas sim retangular com cantos arredondados, o que aumenta a área de passagem de fluido e a superfície de troca de calor do líquido ao escoar internamente pelo tubo.

Com tais dados foi possível calcular a altura total (HT) desses componentes, de modo que não ultrapassassem os limites impostos anteriormente pelo grupo.

Na figura abaixo é possível visualizar as dimensões das aletas de maneira mais clara.

Figura 35 - Dimensões adotadas inicialmente para as aletas



Fonte: Autores.

Como é possível notar pelo desenho, a seção da aleta se mantém constante ao longo de toda a forma e extensão dela, propiciando uma troca de calor mais homogênea e eficiente. Outro dado importante a ser observado é o de que a altura adotada para a aleta é de 1,5 mm. Essa simbologia se deve ao fato de a parte superior da aleta não trocar calor com o ar em uma quantidade significativa, visto que a parte superior da aleta estará soldada aos tubos, onde haverá predominantemente a troca de calor por condução entre o restante da área da aleta e a área superficial dos tubos.

Com todas as considerações feitas, foi utilizado o seguinte cálculo da altura dessa estrutura (HE):

$$HE = N * (ht + 2tt) + (N - 1) * ha$$

$$HE = 62 * (2 + 2 * 0,15) + (62 - 1) * 1,5$$

$$HE = 234,1 \text{ mm}; \quad 234,1 < 235, \text{ logo, a condição inicial foi respeitada.}$$

Em seguida, foram utilizados os dados da tabela de propriedades do fluido e do material⁴ e os dados do estado inicial dos materiais para realizar os cálculos de troca de calor, bem como as áreas de troca de calor envolvidas no processo.

Na tabela abaixo, seguem os dados de estado inicial dos materiais:

Tabela 10 - Dados iniciais dos materiais

Tabela de dados iniciais dos materiais		
Temperatura de entrada do fluido - T_{i_fluido}	120	C°
Temperatura entrada ar - T_{i_ar}	35	C°
Vazão de fluido - Q_{fluido}	0,00018	m³/s
Vazão de ar - Q_{ar}	1,32	m³/s

Fonte: Autores.

O primeiro cálculo trata da determinação da área de seção transversal das aletas, superfície que será responsável pela maior parcela de calor trocado pelo sistema:

$$A_{transversal \text{ de passagem do ar}} = (N - 1) * L * ha \quad [m^2]$$

$$A_{transversal \text{ de passagem do ar}} = (62 - 1) * \frac{420}{1.000} * \frac{1,5}{1.000} \quad [m^2]$$

$$A_{transversal \text{ de passagem do ar}} = 0,0384 \text{ m}^2$$

Em seguida, é calculada V_1 , que representa a velocidade do ar ao atingir a parte frontal do radiador do veículo.

⁴ Cf. Apêndice G.

$$V1 = \frac{Q_a}{A_{transversal\ de\ passagem\ do\ ar}} \quad [m/s]$$

$$V1 = \frac{1,32}{0,0384} \quad [m/s]$$

$$V1 = 34,35 \text{ m/s}$$

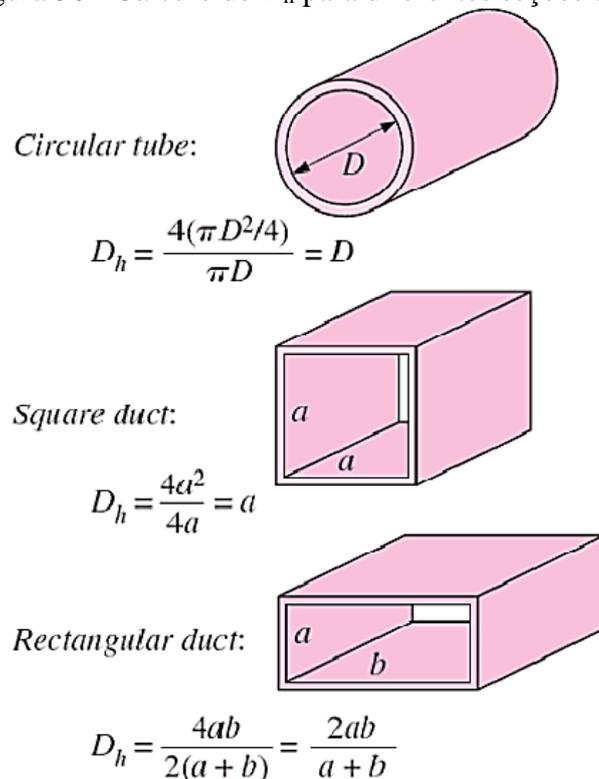
$$V1 = V1[m/s] * 3,6 \quad [km/h]$$

$$V1 = 34,35 * 3,6 = 123,6 \text{ km/h}$$

Além disso, se faz necessária a determinação do diâmetro hidráulico (D_h) das aletas. Esse cálculo visa manipular o fluxo de fluido em canais com seções não circulares, transformando a seção não circular estudada em diâmetro equivalente para facilitamento dos cálculos das propriedades que serão apresentadas mais à frente.

Na figura abaixo é possível entender mais sobre os cálculos de D_h .

Figura 36 - Cálculo de D_h para diferentes seções de tubulação



Fonte: CONNOR, 2019.

Para o cálculo, será utilizado o caso de duto retangular com algumas modificações devido ao formato irregular das aletas.

$$D_{h_aleta} = \left(\frac{4ha * (la - 2 * ta)}{2ha + la - 2ta} \right) * \frac{1}{1.000} \quad [m]$$

$$D_{h_aleta} = \left(\frac{4 * 1,5 * (1,5 - 2 * 0,2)}{2 * 1,5 + 1,5 - 2 * 0,2} \right) * \frac{1}{1.000} \quad [m]$$

$$D_{h_aleta} = 0,0016 \text{ m}$$

Outra grandeza importante para análise da eficiência da troca térmica, bem como suas implicações e condições para sua ocorrência de maneira adequada, é o número de *Reynolds*.

O número de *Reynolds* (*Re*), em homenagem ao físico e engenheiro britânico Osborne Reynolds (1842-1912), é um número adimensional largamente utilizado em estudos de transmissão de calor e de mecânica dos fluidos para calcular o regime de escoamento de um fluido. *Re* é responsável por relacionar as forças de inércia atuantes em um fluido e as forças de viscosidade dele, obtendo um quociente entre elas.

Logo, *Re* pode ser calculado por $Re = \frac{r*v*D_h}{m}$, onde *r* é a massa específica do fluido, *v* é a velocidade média de escoamento do fluido e *m* é a viscosidade dinâmica do fluido.

A análise de *Re* permite avaliar a estabilidade do fluxo do fluido e classificá-la em três possíveis categorias: fluxo laminar, transitório ou turbulento. Os intervalos de cada categoria variam conforme o tipo de situação em que o fluido se encontra, como escoamento cruzado, escoamento forçado por máquinas, entre outros.

Realizando o cálculo de *Re* para o escoamento do ar entre as aletas, temos:

$$Re_{ar} = \frac{r_{ar} * V1 * D_{h_aleta}}{m_{ar}}$$

$$Re_{ar} = \frac{1,137 * 34,35 * 0,0016}{0,00001912} = 3.288$$

Portanto o ar externo possui um escoamento laminar ao escoar entre as aletas.

Após o cálculo de Re , outros dois números adimensionais devem ser calculados para que o estudo da troca de calor do Projeto Jotun seja válido: $Prandtl$ e Nu .

O primeiro homenageia o engenheiro alemão Ludwig Prandtl (1875-1953), e permite avaliar a relação entre a viscosidade cinemática (ν), que é a relação entre a viscosidade dinâmica (μ) e a massa específica do fluido (ρ), e a difusividade térmica (α), que representa a rapidez com a qual o calor se difunde através de um material, que é uma relação entre a condutividade térmica de um material (k) e a capacidade específica de calor do material (cp). Logo, $Prandtl$ avalia a resistência do material aos fluxos de cisalhamento, devido ao gradiente de velocidade gerado pelo fluido no interior da tubulação, em relação à densidade, podendo ser calculado pelas relações $\alpha = \frac{k}{\rho * cp}$, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ e $Prandtl = \frac{\nu}{\alpha}$, logo temos que $Prandtl = \frac{\mu * cp}{k}$.

O segundo homenageia o físico alemão Wilhelm Nusselt (1882-1957), e permite determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção (h), sendo que Nu é uma relação entre Re e $Prandtl$. Como Nu depende de Re , e este varia conforme a situação de escoamento do fluido, não há uma fórmula única para Nu , mas de maneira generalizada é possível dizer que $Nu = \frac{h * D_h}{k}$.

Utilizando os dados apresentados anteriormente, é possível calcular os adimensionais mencionados anteriormente:

$$Prandtl_{ar} = \frac{\mu_{ar} * Cp_{ar}}{k_{ar}} = \frac{0,00001912 * 1004,16}{0,02663} = 0,721$$

Em discussão com o Professor Me. Rodrigo Bernardello, o grupo percebe que devido à relação entre seção de passagem do ar entre as aletas e comprimento das mesmas ser desproporcional, com as dimensões da seção de passagem sendo muito inferiores às dimensões de comprimento da aleta, temos um efeito de micro-canalização do ar ao longo das aletas, resultando em um Nu estático devido à condição apresentada anteriormente, exemplificada pela figura abaixo:

Figura 37 - Condição de escoamento do fluido internamente nos tubos

CONVECCÃO FORÇADA INTERNA LAMINAR (Condição: $Re_{Dh} < 2100$)			
Escoamento totalmente desenvolvido p/ seção circular (eq. 6.31 e 6.32). Efeitos de entrada desprezíveis.	$Nu_D = \frac{h_c \cdot D_H}{k} = 4,364$ (eq. 6.31): $q_s(x) = cte.$	$Nu_D = \frac{h_c \cdot D_H}{k} = 3,66$ (eq. 6.32): $T_s(x) = cte.$	$\frac{\Delta T_{saída}}{\Delta T_{entrada}} = \exp\left(-\frac{h_c \cdot P \cdot L}{\dot{m} \cdot c_p}\right)$ (eq. 6.36)

Fonte: Centro Universitário FEI⁵

Logo, munidos de tal conhecimento, temos que:

$$Nu_{ar} = 3,66$$

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{k}, \text{ então } h = \frac{Nu \cdot k}{D_h}$$

$$h_{ar} = \frac{Nu_{ar} \cdot k_{ar}}{D_{h_aleta}} = \frac{3,66 \cdot 0,02663}{0,001661} = 58,68 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Baseando-se nos passos demonstrados acima, foram calculados os números adimensionais, D_h , $\text{Área}_{transversal \text{ de passagem do fluido}}$ e velocidade do fluido, para que pudesse ser utilizado o método NTU para o cálculo da área do radiador.

Foram utilizadas as tabelas 7, 8, 9 e a presente no Apêndice G para a realização dos cálculos relacionados ao fluido, como explicitados abaixo:

$$A_{transversal \text{ de passagem do fluido}} = N \cdot ht \cdot lt \quad [m^2]$$

$$A_{transversal \text{ de passagem do fluido}} = \frac{62 \cdot 2 \cdot 50}{1 \cdot 10^6} = 0,0062 \text{ m}^2$$

$$V_{fluido} = \frac{Q_f}{A_{transversal \text{ de passagem do líquido}}} \quad [m/s]$$

$$V_{fluido} = \frac{0,00018}{0,0062} = 0,029 \text{ m/s}$$

⁵ Retirado do Formulário de Transmissão de Calor Aplicada, disponível no campo de Transmissão de Calor Aplicada no Moodle FEI.

$$V_{fluido_km/h} = 0,029 * 3,6 = 0,104 \text{ km/h}$$

$$D_{h_fluido} = \frac{4ht * lt}{2(ht + lt)} \quad [m]$$

$$D_{h_fluido} = \frac{4 * 2 * 50}{2 * (2 + 50)} * \frac{1}{1.10^3} = 0,0038 \text{ m}$$

$$Re_{fluido} = \frac{\rho_{fluido} * D_{h_fluido} * V_{fluido}}{\nu_{fluido}}$$

$$Re_{fluido} = \frac{1.015,57 * 0,0038 * 0,029}{0,0007441} = 154,4$$

Como visto na condição apresentada, temos que $Re_{fluido} = 154,4 < 2.100$, logo temos um escoamento laminar do fluido no interior dos tubos.

Além disso, temos que $Nu_{fluido} = 3,66$, o que torna possível o cálculo do h_{fluido} pelo seguinte equacionamento:

$$h_{fluido} = \frac{Nu_{fluido} * k_{fluido}}{D_{h_fluido}}$$

$$h_{fluido} = \frac{3,66 * 0,4151}{0,0038} = 395 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Também se faz necessária a determinação da área de troca de calor do fluido e do ar, calculadas abaixo:

$$A_{troca_fluido} = 2N * (lt + ht) * L \quad [m^2]$$

$$A_{troca_fluido} = \frac{62 * (2 + 50) * 2 * 420}{1.10^6} = 2,71 \text{ m}^2$$

$$A_{troca_ar} = \frac{(N-1)*L}{2la-ta} * \{4*[(ha*ta+ta*(la-2ta))+lt*(ha-ta)]+2lt*(la-2ta)\}$$

$$A_{troca_ar} = \frac{61 * 420}{2 * 1,5 - 0,2} * \{4 * [1,5 * 0,2 + 0,2 * (1,5 - 2 * 0,2)] + 50 * (1,5 - 0,2)\} + 2 * 50 * (1,5 - 2 * 0,2)$$

$$A_{troca_ar} = 3,41 \text{ m}^2$$

Uma das conclusões iniciais do grupo é que área de troca de calor total é representada pela soma de A_{troca_ar} e A_{troca_fluido} , totalizando 6,12m².

Esse valor representa a totalidade da superfície disponível para que todo o calor rejeitado pelo componente seja retirado pela vazão de ar que atravessa a frente do radiador.

Utilizando os dados obtidos pelos cálculos, é possível determinar UA_s pela utilização da equação de determinação do coeficiente global de transferência de calor.

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{h_i * A_i} + \frac{1}{h_o * A_o} = \frac{1}{A_{troca_ar} * h_{ar}} + \frac{1}{A_{troca_fluido} * h_{fluido}}$$

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{3,41 * 58,68} + \frac{1}{2,71 * 395}$$

$$UA_s = 172,3 \text{ W/K}$$

Vale comentar que caso as aletas tivessem uma altura (direção do fluxo de calor) maior seria necessário calcular a efetividade da aleta. Calcular a efetividade seria necessária, pois a temperatura da superfície da aleta iria ter uma variação maior.

Após a determinação de UA_s , se faz necessária a determinação das capacidades térmicas tanto do ar quanto do fluido de arrefecimento, utilizando as relações abaixo:

$$C_{ar} = \dot{m}_{ar} * C_{p_{ar}}$$

$$C_{fluido} = \dot{m}_{fluido} * C_{p_{fluido}}$$

$$\dot{m}_{ar} = Q_{ar} * \rho_{ar}$$

$$\dot{m}_{fluido} = Q_{fluido} * \rho_{fluido}$$

$$C_{ar} = 1,32 * 1,137 * 1.004,16 = 1.507,083 \text{ kW/K}$$

$$C_{fluido} = 3.681,92 * 1.015,57 * 0,00018 = 673,065 \text{ kW/K}$$

Posteriormente ao cálculo das capacidades térmicas, há a utilização do menor valor encontrado para o cálculo do NTU. Neste caso, será utilizado o valor da capacidade térmica do fluido.

Além do cálculo do NTU, o adimensional (c), denominado de razão de capacidades, que nada mais é do que a divisão entre a menor capacidade térmica pela maior capacidade térmica encontrada no sistema.

Vale ressaltar que $0 < c \leq 1$, logo, realizando os cálculos, temos que:

$$c = \frac{C_{mín}}{C_{máx}} = \frac{C_{fluido}}{C_{ar}} = \frac{673,065}{1.507,083} = 0,4466$$

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{mín}} = \frac{172,3}{673,065} = 0,257$$

Um dos últimos cálculos necessários para o cálculo da área do radiador e das especificações do radiador é o cálculo da efetividade do radiador.

Efetividade, segundo Çengel e Ghajar (2012), no livro de Transferência de Calor e Massa, é um parâmetro adimensional que relaciona a taxa de transferência de calor real e a taxa de transferência de calor máxima possível, algo similar à eficiência do trocador de calor.

Para o caso de trocadores de calor aletados com corrente cruzada e onde não há mistura dos fluidos, caso dos radiadores automotivos, o cálculo da efetividade pode ser obtido por:

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(\frac{NTU^{0,22}}{c} * (e^{-c*NTU^{0,78}} - 1)\right)$$

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(\frac{0,2505^{0,22}}{0,4466} * (e^{-0,4466*0,2505^{0,78}} - 1)\right) = 0,2117$$

$$\varepsilon = 21,17\%$$

$$\varepsilon = \frac{\text{Troca de calor real}}{\text{Troca de calor máxima possível}}$$

Após o cálculo de ε , foi possível determinar a quantidade real de troca de calor, utilizando os dados da Tabela 10, pela expressão abaixo:

$$Q_{real} = \varepsilon * C_{mín} * (T_{i_fluido} - T_{i_ar})$$

$$Q_{real} = 0,2117 * 673,065 * (120 - 35) = 12.111,5 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{radiador_motor} = \dot{Q}_{radiador_inversor} = 12.111,5 \text{ W}$$

Q_{real} , após a análise do grupo, representa a quantidade de calor que deve ser trocada entre fluido de arrefecimento no interior dos tubos e massa de ar que atravessa a extensão do radiador durante o período no qual o veículo permanece em movimento.

Baseando-se nisso, houve a possibilidade de determinar a temperatura de saída do fluido após ser resfriado pelo ar, explicitado abaixo pelas seguintes equações:

$$Q_{real} = Q_{fluido} = \dot{m}_{fluido} * C_{p_fluido} * (T_{i_fluido} - T_{f_fluido})$$

$$\dot{m}_{fluido} = \dot{Q}_{fluido} * \rho_{fluido}$$

onde T_{f_fluido} representa a temperatura de saída do fluido após percorrer a extensão do radiador.

$$12.111,5 = 0,00018 * 1015,57 * 3681,92 * (120 - T_{f_fluido})$$

$$T_{f_fluido} = 102 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A conclusão inicial desse estudo mostra que, no caso mais crítico, o radiador do veículo é capaz de reduzir a temperatura do fluido de 120°C iniciais para, 102°C finais, uma redução de 8°C, obtendo uma temperatura final 15% menor do que a inicial.

O último passo é verificar a validade dos radiadores dedicados aos componentes, de modo que $\dot{Q}_{radiador_motor} > \dot{Q}_{motor}$ e $\dot{Q}_{radiador_inversor} > \dot{Q}_{inversor}$, verificado pelo equacionamento abaixo:

$$\dot{Q}_{radiador_motor} > \dot{Q}_{motor} \text{ e } \dot{Q}_{radiador_inversor} > \dot{Q}_{inversor}$$

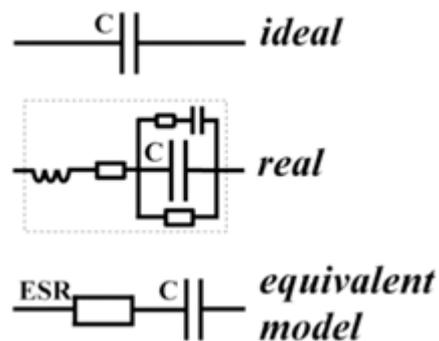
$$12.111,5 \text{ W} > 11.203,8 \text{ W} \text{ e } 12.111,5 \text{ W} > 9.457,1 \text{ W}$$

A conclusão final do grupo é que os radiadores dedicados aos componentes do *powertrain* serão capazes de desempenhar suas funções com segurança, visto que a carga térmica calculada para o radiador é 8% maior que o necessário para o motor elétrico e 28,1% maior do que o necessário para o inversor elétrico, ambos atuando em suas piores condições de trabalho.

8.2 CAPACITOR DO INVERSOR

A ESR é a resistência equivalente em série que todo capacitor tem. Um capacitor ideal apresenta uma capacitância conforme a frequência de trabalho. O capacitor real tem alguns outros parâmetros que devem ser levados em consideração, um deles é uma resistência em série que acontece em função dos próprios materiais que compõem o capacitor. A resistência do capacitor por possuir um dielétrico comum eletrolítico aumenta conforme seu tempo de uso. Além da resistência, o capacitor possui uma indutância equivalente em série (ESL) e uma resistência paralela a ESL. Na maioria dos casos o ESL e a equivalente em série a este geralmente são desprezíveis se comparado ao ESR. Veja na figura a seguir a representação dos capacitores:

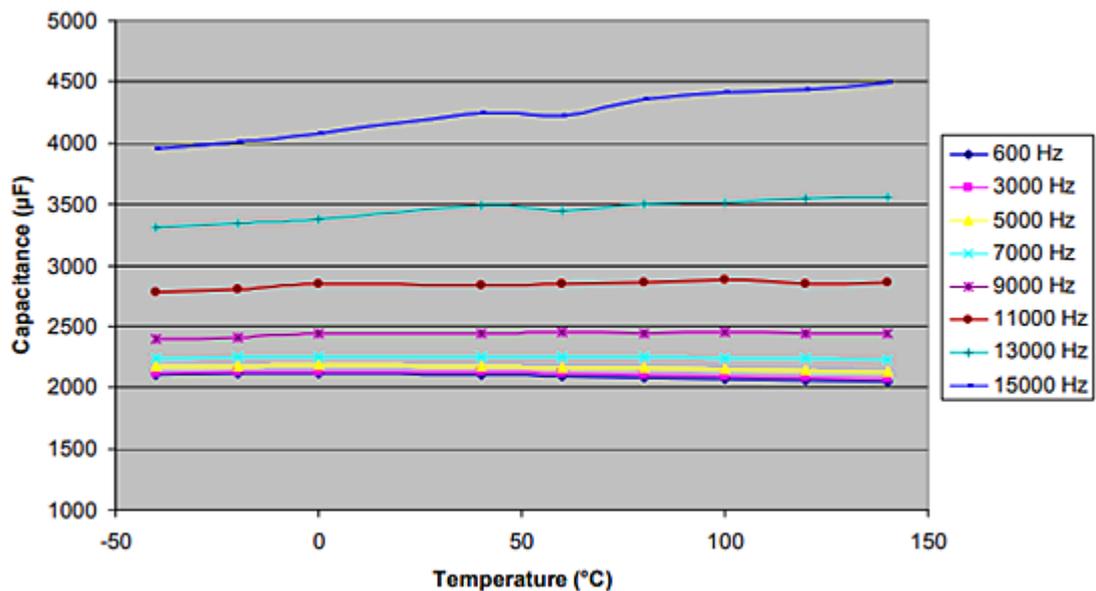
Figura 38 - Modelo equivalente do capacitor para estudo



Fonte: TEYSSANDIER, F; PRELÊ, 2010, p. 02.

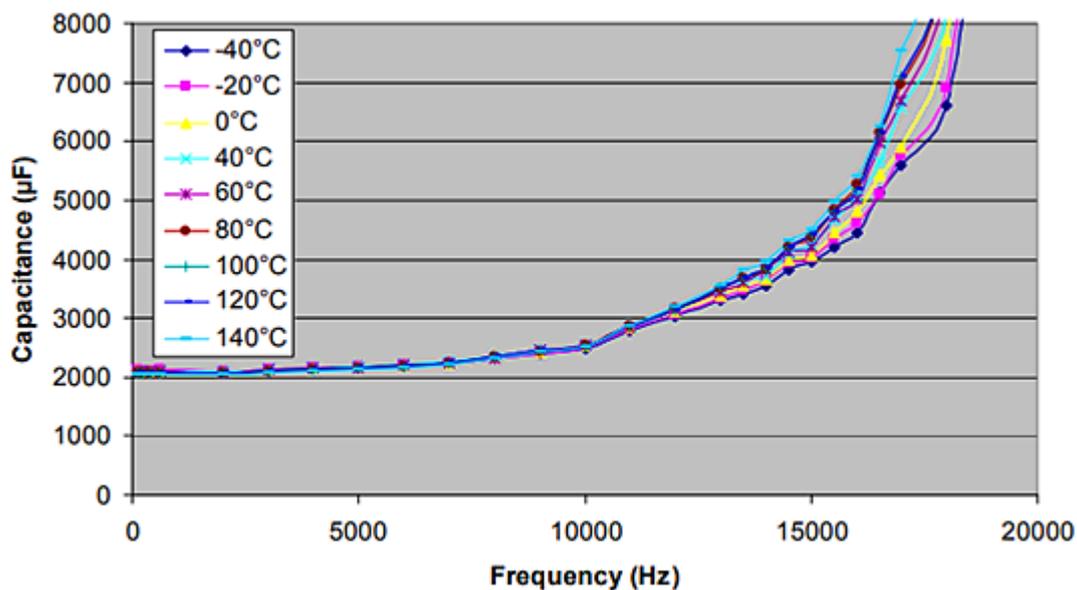
Assim sendo, a ESR é o componente real da impedância - carga resistiva do circuito CA, pode-se considerar que a ESR corresponde a perda total de energia que é dissipada como calor durante a operação. O gráfico a seguir foi feito utilizando 3 fatores, são eles: resistência equivalente em série, fator de dissipação e valor da capacitância.

Figura 39 – Gráfico da capacitância em função da temperatura



Fonte: BURRESS *et. al.*, 2011, p. 26.

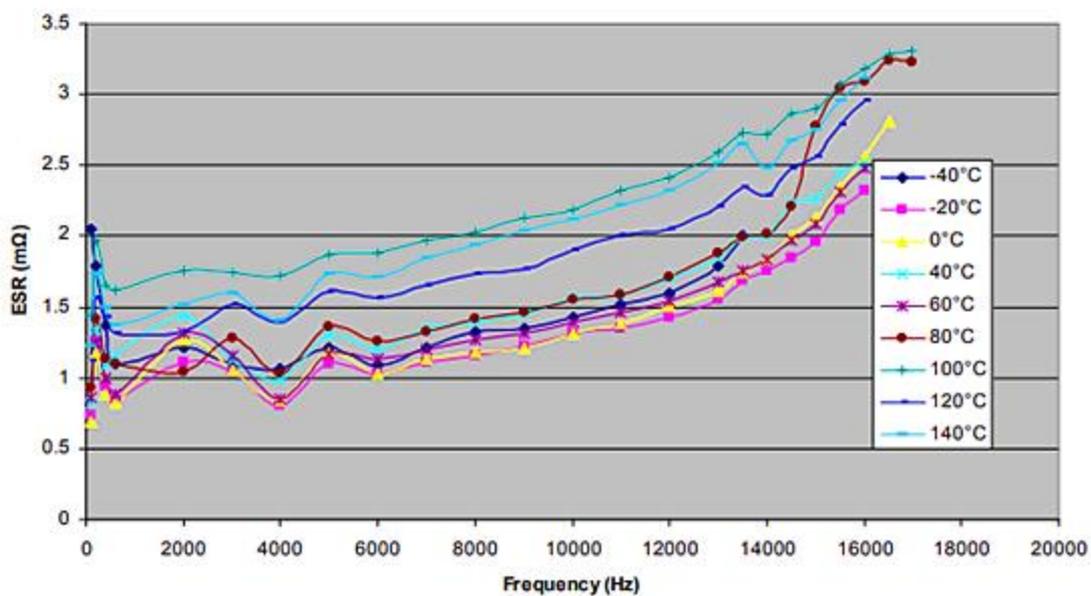
Figura 40 - Gráfico da capacitância em função da frequência



Fonte: BURRESS *et. al.*, 2011, p. 28.

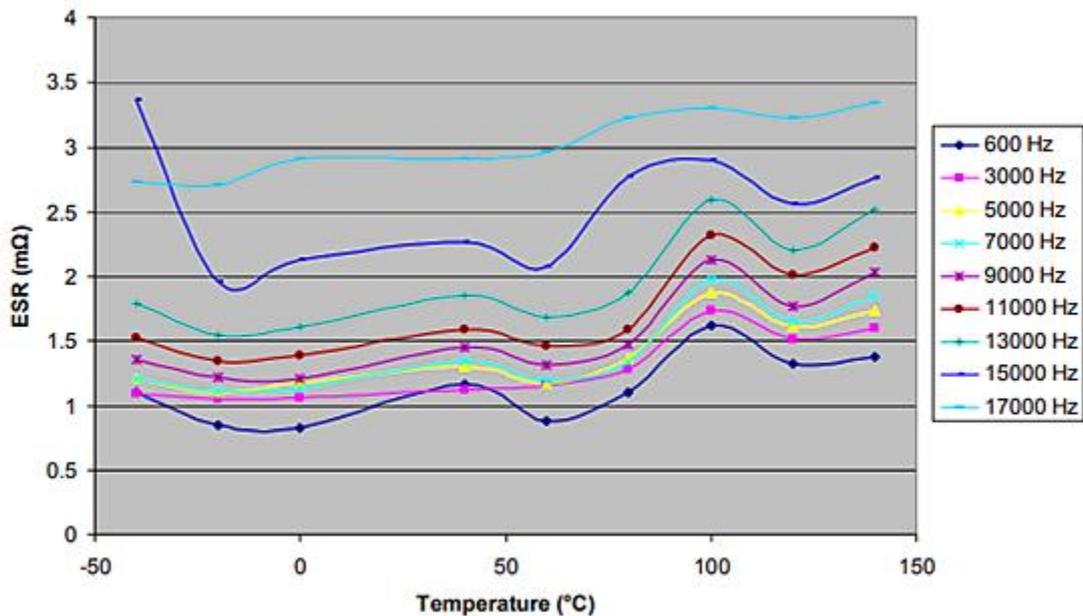
As figuras a seguir mostram a frequência para o módulo *Prius*. As medições indicam que os valores ESR geralmente aumentam com o aumento da temperatura.

Figura 41 - Gráfico de ESR em função da frequência



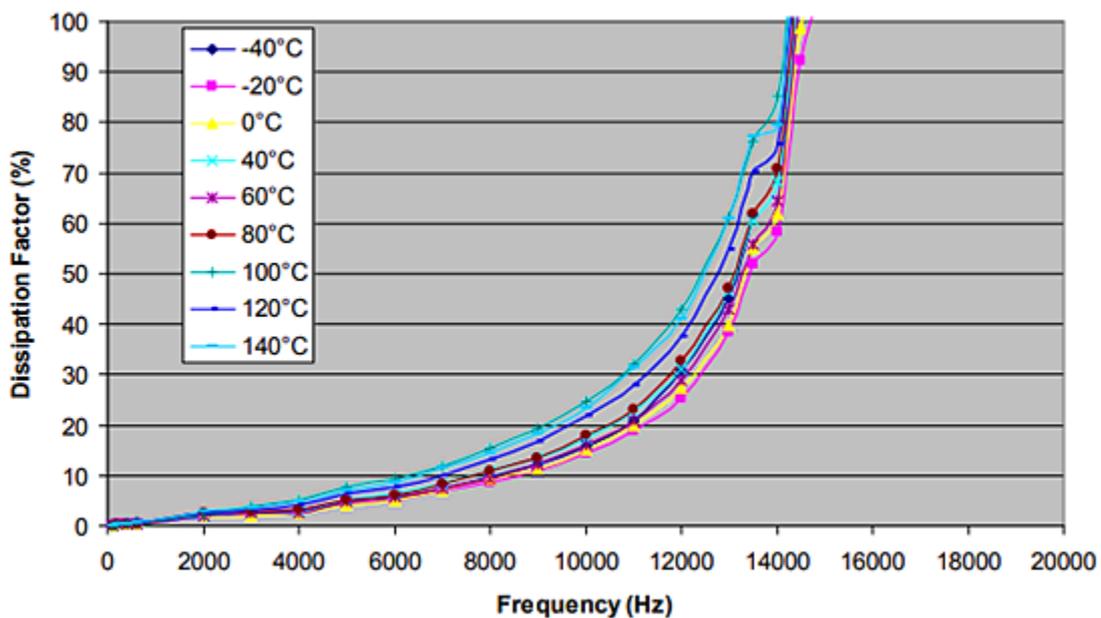
Fonte: BURRESS *et. al.*, 2011, p. 30.

Figura 42 - Gráfico de ESR em função da temperatura



Fonte: BURRESS *et. al.*, 2011, p. 31.

Figura 43 - Gráfico de fator de dissipação em função da frequência

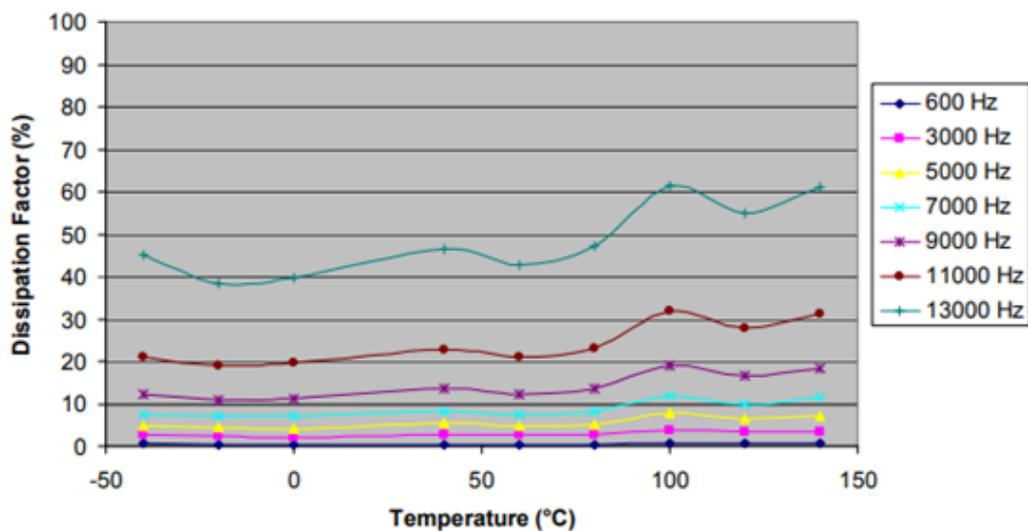


Fonte: BURRESS *et. al.*, 2011, p. 32.

O impacto da temperatura no DF dos módulos capacitores do *Prius* para cada frequência de teste é observado na figura seguinte. Semelhante ao impacto da temperatura sobre a capacitância, o DF geralmente aumenta com o aumento da temperatura. Além disso, a temperatura tem um impacto maior no DF em frequências mais altas. Uma vez que o ESR aumenta naturalmente com o aumento da temperatura, a quantidade de a

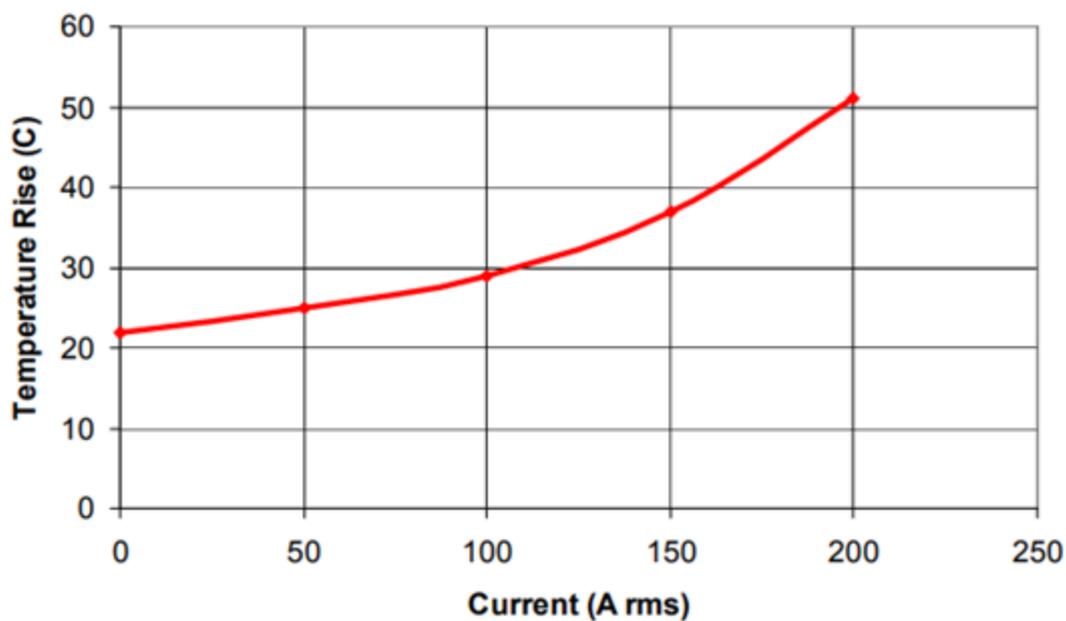
potência dissipada em uma determinada quantidade de potência reativa aumenta à medida que a temperatura aumenta.

Figura 44 - Gráfico de fator de dissipação em função da temperatura



Fonte: BURRESS *et. al.*, 2011, p. 33.

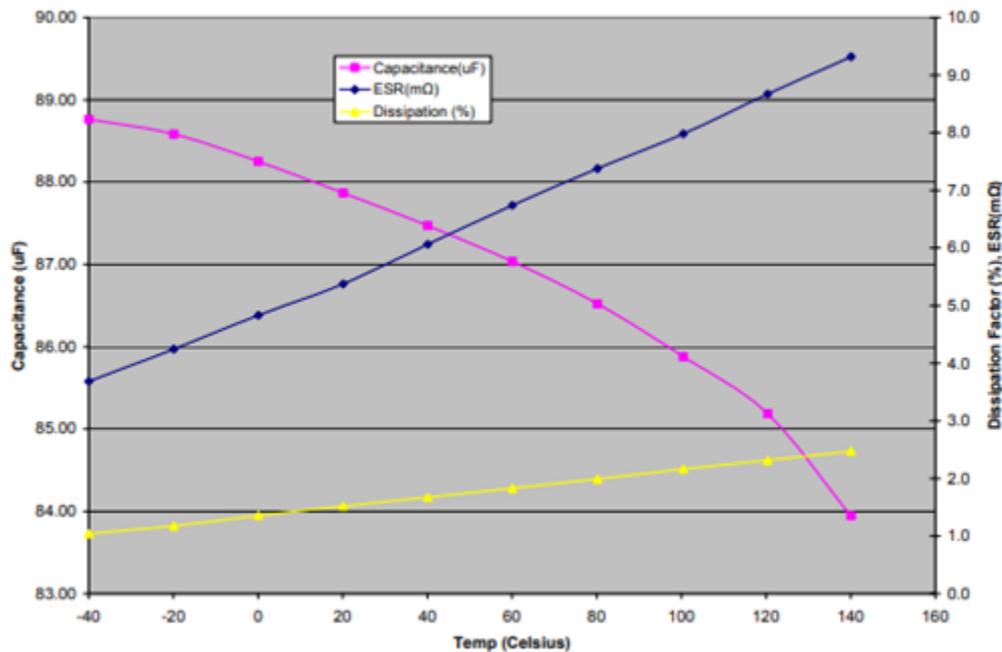
Figura 45 - Gráfico de temperatura em função da corrente.



Fonte: BURRESS *et. al.*, 2011, p. 35.

O módulo capacitor *Prius* contém (8) sub-células de 141 μF para formar capacitância total de 1.130 μF .

Figura 46 - Gráfico da capacitância em função da temperatura



Fonte: BURRESS *et. al.*, 2011, p. 38.

8.3 TUBULAÇÃO E BOMBA D'ÁGUA

Após o cálculo do radiador, as dimensões necessárias para o desenvolvimento do sistema foram estabelecidas para o radiador e com podemos calcular a bomba necessária para atender o sistema.

Para iniciarmos o dimensionamento do sistema precisamos saber qual o diâmetro da tubulação, sendo separado entre a tubulação do radiador em alumínio e a tubulação do sistema que será de borracha. Para o cálculo do diâmetro na tubulação de borracha utilizaremos o cálculo do diâmetro econômico de *Bressed* onde será considerado o coeficiente econômico (K), este que varia entre 0,75 e 1,1 e deve ser considerado por critério de cada projetista, onde foi considerado 1,1 e a vazão volumétrica (Q) anteriormente calculada em 10,6 L/min ou 0,00018 m³/s, então temos:

$$D = K \times \sqrt{Q}$$

$$D = 1,1 \times \sqrt{0,00018}$$

$$D = 0,015m = 15mm$$

Após o cálculo do diâmetro da tubulação, podemos considerar então a velocidade nos tubos:

$$V = \frac{4}{\pi * K^2}$$

$$\text{Ou, } V = \frac{Q}{A_{tubo}}$$

$$V = \frac{4}{\pi * 1,1^2}$$

$$V = 1,052 \text{ m/s}$$

Já para a tubulação em alumínio, consideraremos para fins didáticos que o radiador é composto por 62 tubos cilíndricos com diâmetro de 34mm, e, com isso, a velocidade nos tubos do radiador será de:

$$V = \frac{Q}{A_{tubo}}$$

$$V = \frac{Q}{\left(\frac{\pi * D^2}{4}\right)}$$

$$V = \frac{0,00018}{\left(\frac{\pi * 0,034^2}{4}\right)}$$

$$V = 0,195 \text{ m/s}$$

Para que seja possível o cálculo da altura manométrica (Hb) da instalação, precisamos calcular as perdas no sistema, necessitamos assim do fator de atrito (f) dos materiais, então será necessário o cálculo do número de *Reynolds* (Re) neste sistema, sendo novamente separado entre os o radiador e a tubulação de borracha, onde teremos a

densidade (ρ) do etileno glicol de 1015,57 Kg/m³ e viscosidade dinâmica (μ) dele deste fluido de 0,0007441, e com isso teremos para a tubulação de borracha:

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu}$$

$$Re = \frac{1015,57 * 1,052 * 0,015}{7,441 * 10^4}$$

$$Re = 20.998$$

Para a tubulação de Alumínio, temos:

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu}$$

$$Re = \frac{1015,57 * 0,195 * 0,034}{7,441 * 10^4}$$

$$Re = 9.030$$

Como em ambos os cálculos temos valores de Reynolds superiores a 4.000 nosso escoamento será turbulento.

Na sequência calcularemos a rugosidade relativa dos diferentes materiais para assim analisar no diagrama de *Moody*, e para isso consideraremos a rugosidade (ϵ) da borracha como $0,0007 \times 10^{-3}$ m e do alumínio de $0,000004 \times 10^{-3}$ m e com isso temos respectivamente o cálculo:

$$\text{Rugosidade Relativa} = \frac{\epsilon}{D}$$

$$\text{Rugosidade Relativa da Borracha} = \frac{0,0007 * 10^{-3}}{0,015}$$

$$\text{Rugosidade Relativa da Borracha} = 0,000048$$

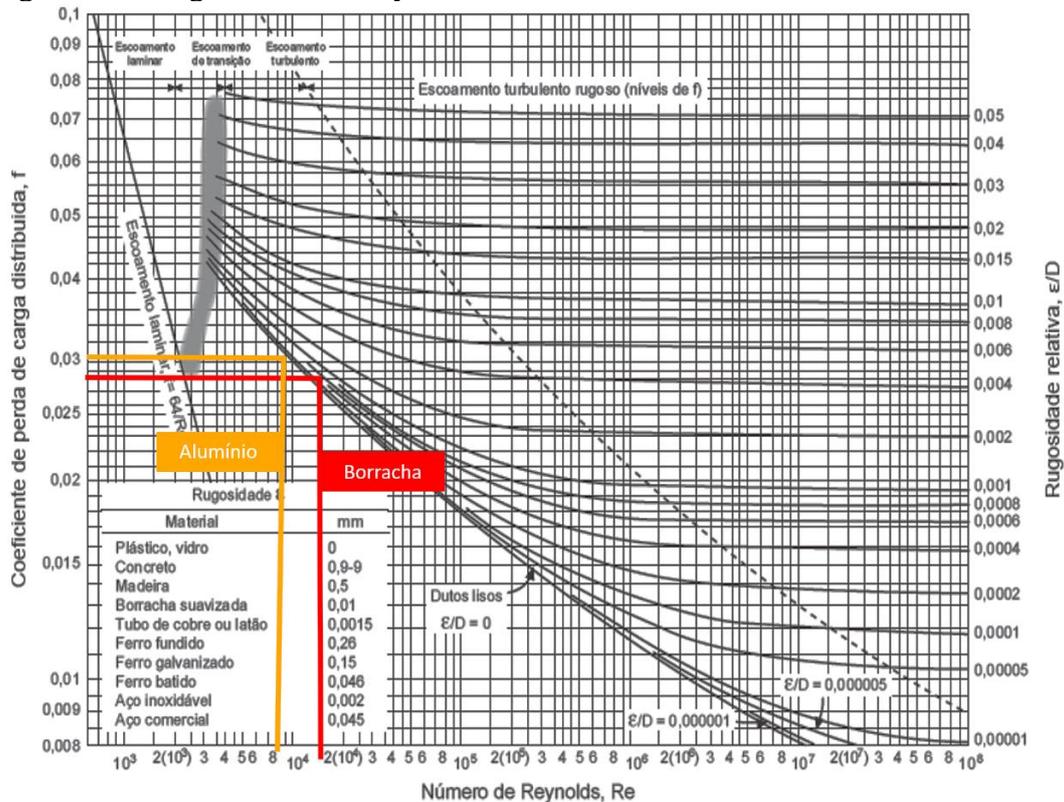
e

$$\text{Rugosidade Relativa do Alumínio} = \frac{0,000004 * 10^{-3}}{0,034}$$

$$\text{Rugosidade Relativa do Alumínio} = 0,000012$$

Com isso, podemos utilizar o diagrama de *Moody* apresentado a seguir:

Figura 47 - Diagrama de *Moody*



Fonte: IZOLA, 2020, p. 23.

Com isso, como mostrado na figura 47 acima, temos o fator de atrito da borracha igual a 0,023 e do alumínio de 0,03.

Dito isto, podemos avançar no cálculo das perdas de carga (P) do sistema, e com isso dividiremos em 4 partes, sendo elas a perda na tubulação de borracha, perdas na tubulação de alumínio, perdas de carga nas conexões e a própria perda de carga na bomba, tais cálculos seguem os padrões apresentados no livro “Bombas e instalações hidráulicas”, escrito por Sérgio Lopes dos Santos (2007).

Para a realização dos cálculos seguiremos a fórmula:

$$P = f * \frac{L_t}{D} * \frac{v^2}{2 * g}$$

Será utilizado o comprimento equivalente (L_t), o diâmetro do tubo (D), o fator de atrito (f), a velocidade do fluido (v) e a aceleração da gravidade (g) para assim obtermos as perdas de carga (P) em metros de carga d'água.

Primeiramente, para o cálculo das perdas na tubulação de borracha consideraremos uma montagem do sistema resultando em 2 metros de tubulação entre a saída do radiador, passando pela bomba e motor, ou inversor, e retornando na entrada do inversor, e com isso temos.

$$P_{borracha} = 0,028 * \frac{2}{0,015} * \frac{1,052^2}{2 * 9,81}$$

$$P_{borracha} = 0,2161 \text{ m}$$

Logo em seguida, analisaremos a tubulação de alumínio, onde temos 62 tubos com 0,5 metros de extensão distribuídos pelo radiador obtendo 3,1 metros de extensão de tubos, calculando:

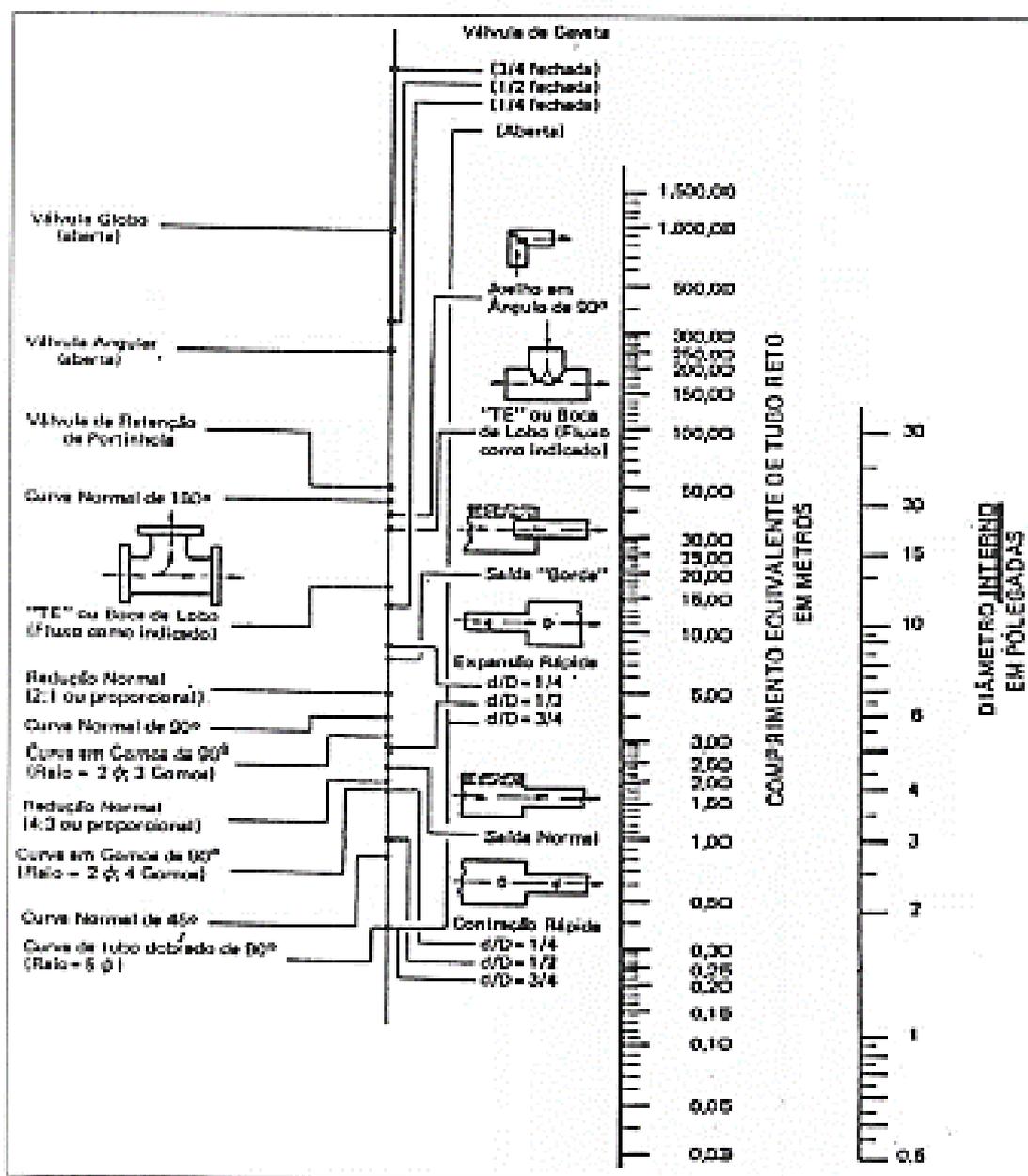
$$P_{alumínio} = 0,03 * \frac{3,1}{0,034} * \frac{0,195^2}{2 * 9,81}$$

$$P_{alumínio} = 0,0053 \text{ m}$$

Já para o cálculo das perdas de carga nas conexões, precisamos conhecer o nosso sistema, e para isso consideraremos que o sistema será utilizado oito cotovelos de 90°, duas reduções 2:1 para ligarmos as tubulações de borracha e o radiador, duas reduções 4:3 para conectarmos a tubulação com a bomba e uma válvula, que, para fins de estudo, a válvula termostática eletrônica que será utilizada no sistema será representada por uma válvula globo.

Figura 48 - Comprimentos equivalentes (m)

Ábaco – Crane Co. – Comprimentos Equivalentes (m)

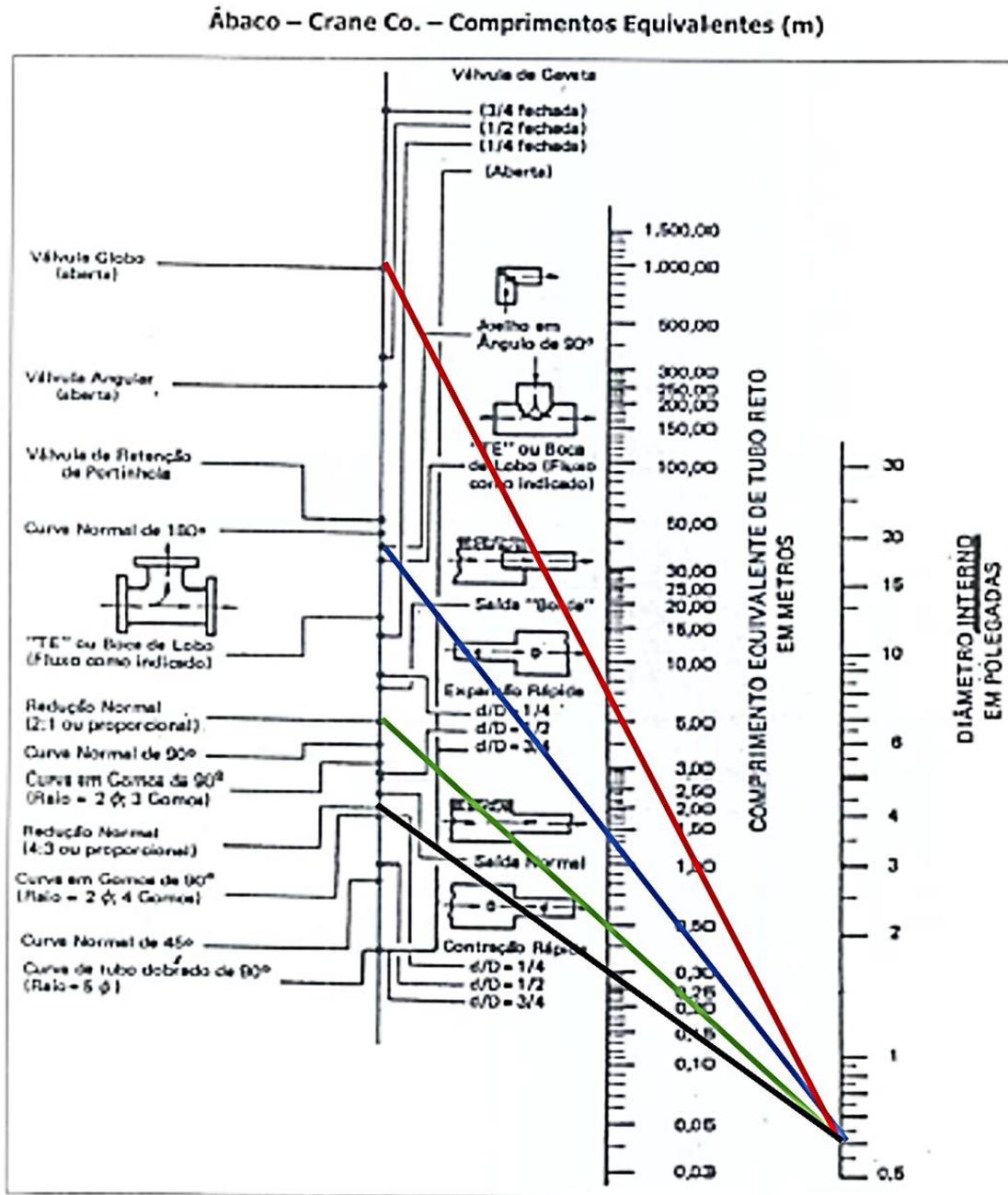


* Os valores dos comprimentos equivalentes para as válvulas são médios. O valor verdadeiro poderá variar bastante dependendo do fabricante e do modelo da válvula. Fonte: Crane Co. (ref. bibliográfica nº 13)

Fonte: SANTOS, 2007, p. 188.

Utilizando o ábaco apresentado na figura 48, para determinação dos comprimentos equivalentes das conexões do sistema, devemos ligar o diâmetro da tubulação com a conexão desejada e assim obter seu comprimento equivalente (L_t).

Figura 49 - Comprimento equivalentes apresentados



Fonte: SANTOS, 2007 p. 188.

Como observado na figura 49, temos os comprimentos equivalentes dos cotovelos de 90° com igual a 1,2 metros, as reduções 2:1 igual a 0,5 metros, reduções 4:3 igual a 0,6 metros e a válvula globo igual a 7 metros, então para o cálculo das perdas de carga nas conexões, temos:

$$P_{conexões} = 0,028 * \frac{8*1,2}{0,015} * \frac{1,052^2}{2*9,81} + 0,028 * \frac{2*0,5}{0,015} * \frac{1,052^2}{2*9,81} + 0,028 * \frac{2*0,6}{0,015} * \frac{1,052^2}{2*9,81} +$$

$$0,028 * \frac{7}{0,015} * \frac{1,052^2}{2*9,81}$$

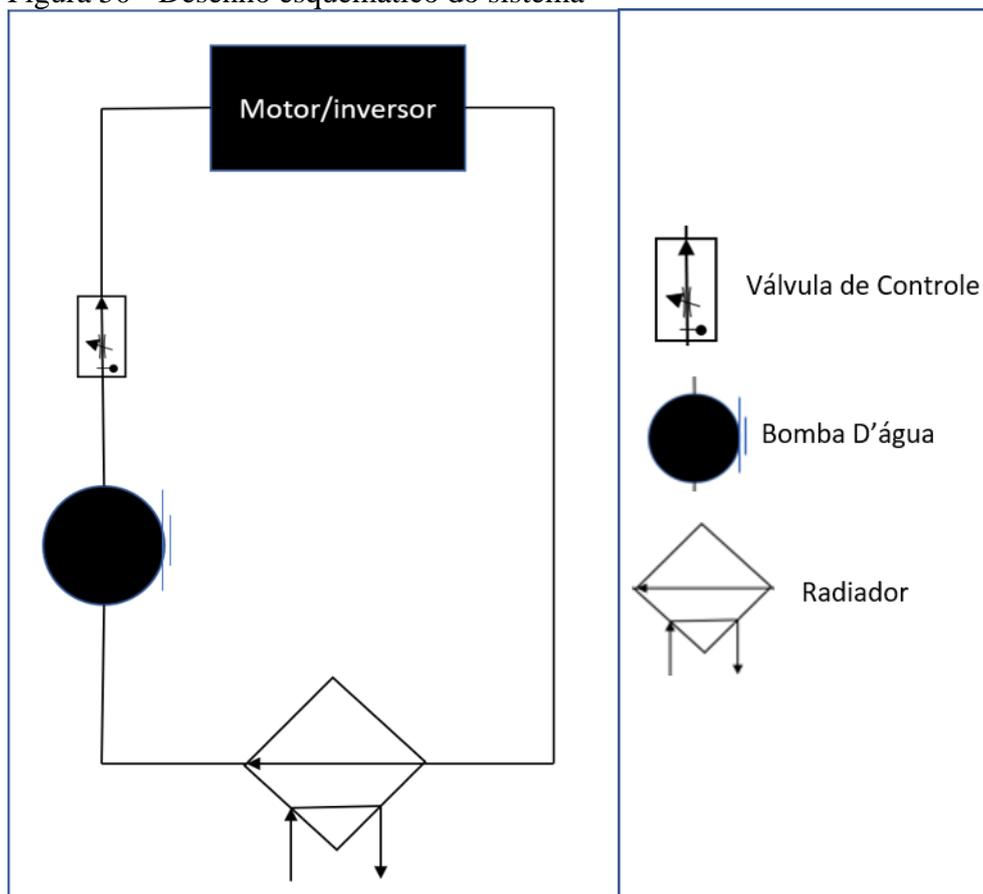
$$P_{conexões} = 2,0319 \text{ m}$$

Por fim, precisamos calcular a altura manométrica (H_b) do sistema, então temos:

$$H_b = P_{borracha} + P_{alumínio} + P_{conexões} + \left(\frac{\Delta P}{\gamma} + \Delta Z + \frac{v^2}{2 * g} \right)$$

Então, como mostrado na fórmula acima, temos a diferença de pressão (ΔP), densidade (γ) a diferença de alturas (ΔZ) e a velocidade (v) a serem analisadas.

Figura 50 - Desenho esquemático do sistema



Fonte: Autores.

Como vemos na Figura 50 mostrada acima, podemos observar que temos um sistema fechado, onde a pressão de entrada e saída são iguais e a diferença de alturas manométricas nulas, então, por fim, temos:

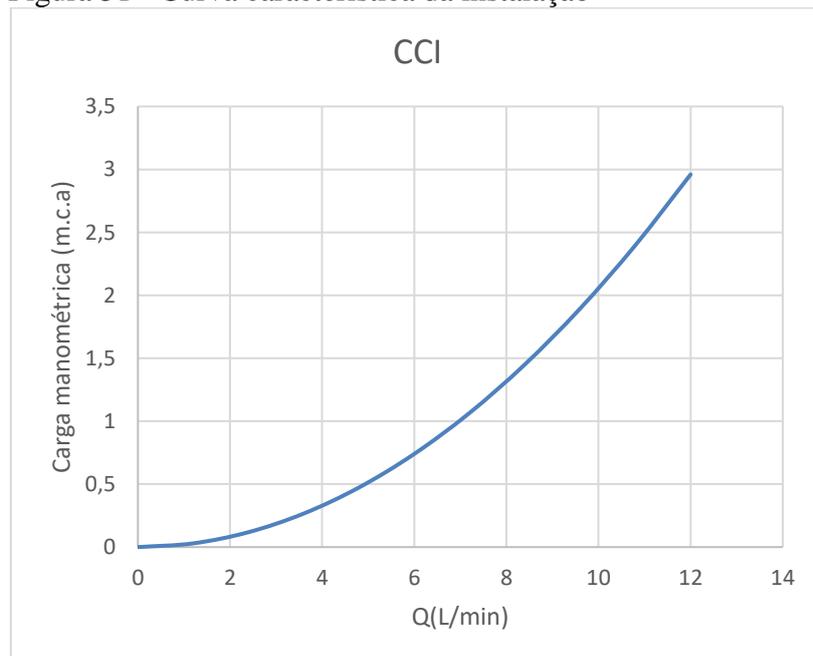
$$H_b = P_{borracha} + P_{alumínio} + P_{conexões} + \frac{v^2}{2 * g}$$

$$H_b = 0,2161 + 0,0053 + 1,5131 + \frac{1,0522^2}{2 * 9,81}$$

$$H_b = 2,3097 \text{ m}$$

Gerando, assim, a curva característica da instalação:

Figura 51 - Curva característica da instalação



Fonte: Autores.

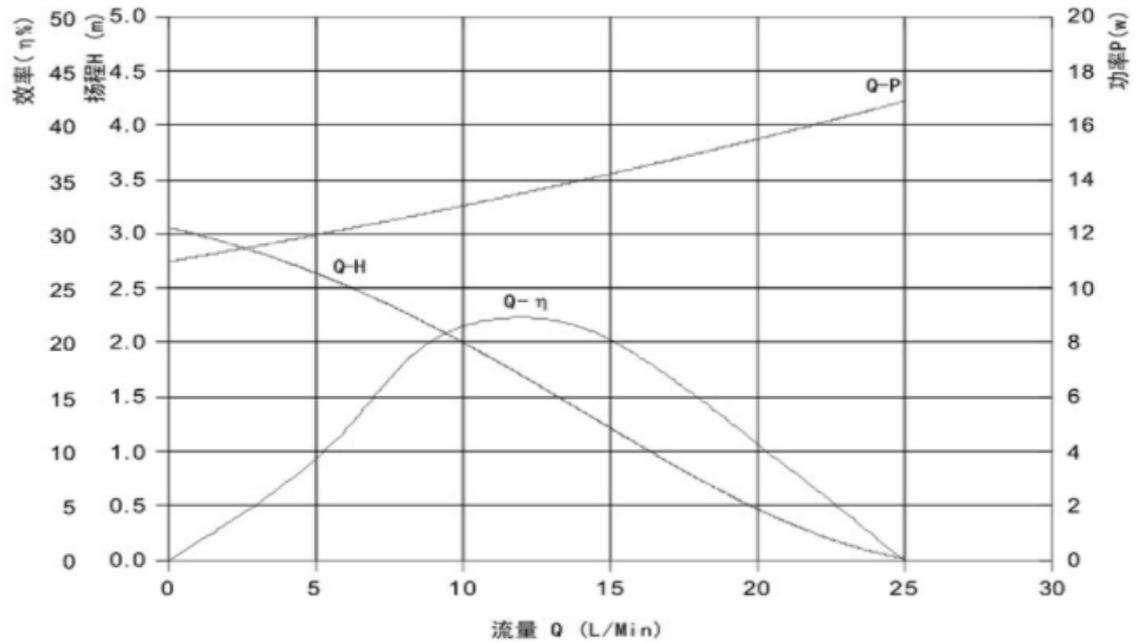
Por fim, com os dados obtidos iremos selecionar a bomba que será utilizada no sistema. Para a vazão de $0,636 \text{ m}^3/\text{h}$ e altura manométrica de $2,309 \text{ m}$ consultamos o catálogo de motobombas Schneider para a escolha da bomba.

Figura 52 - Representação da bomba elétrica utilizada VP50N



Fonte: VOVYO PUMP, 2021.

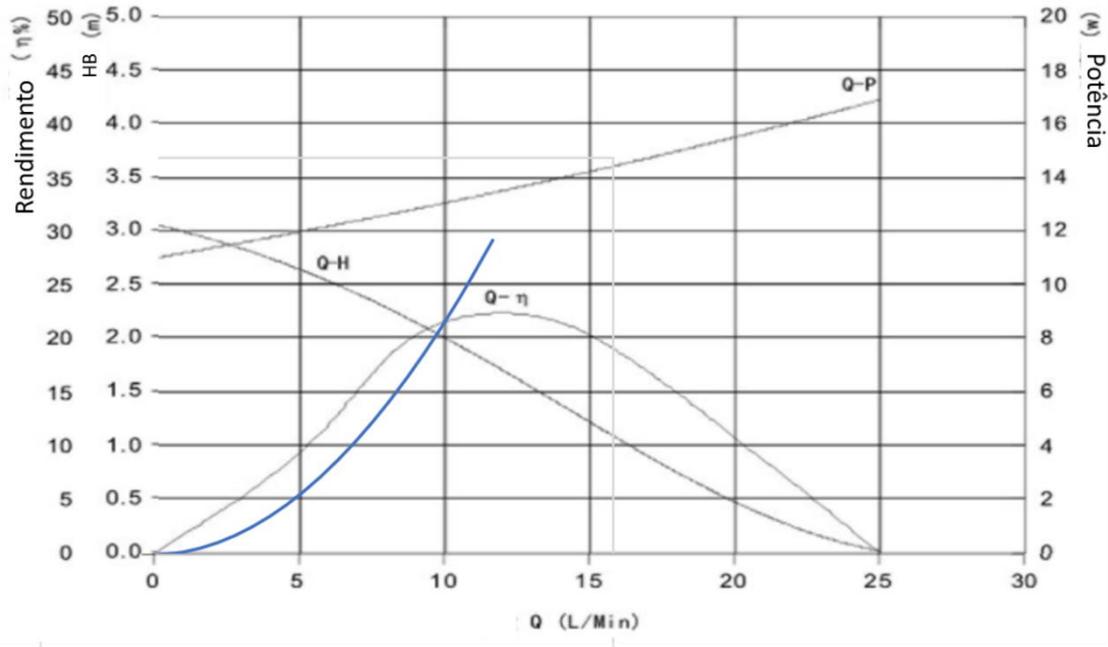
Figura 53 - Curva característica da bomba (CCB)



Fonte: VOVYO PUMP, 2021.

Como apresentado nas figuras 52 e 53, temos a bomba utilizada no sistema, que é uma VP50N da *Vovyo Pump*.

Figura 54 - Intersecção entre a CCI e CCB



Fonte: VOVYO PUMP, 2021.

Como observamos na figura 54, a bomba atende as condições necessárias para o bom funcionamento do sistema e como característica positiva já é uma bomba conhecida no mercado automotivo, compacta e atende temperaturas altas.

Após a escolha da bomba, verificaremos por fim se haverá cavitação na bomba e para que não haja cavitação, o NPSH disponível deve ser maior que o NPSH requerido, então temos:

$$NPSH_{disp} = \frac{Pa}{\gamma} - Za - Ja - \frac{hv}{\gamma}$$

$$NPSH_{req} = \sigma * H + \frac{V0^2}{2 * g}$$

Portanto, será utilizado as perdas de carga no recalque (Ja), que será considerado como metade das perdas do sistema pela montagem do mesmo, a altura manométrica de sucção (Za), considerada como 0 por estarem no mesmo plano, a pressão na sucção (Pa) e a pressão de vaporização (hv), que de acordo com a tabela termodinâmica A-4 – Apêndice 1 do livro Termodinâmica 7ª Edição, 2013, temos que hv para a temperatura de 60 °C equivale à $19,94 \times 10^3$ Pa e $Pa = P = 140 \times 10^3$. Para determinarmos o fator de Thoma (σ) seguiremos as fórmulas:

$$\sigma = \varphi * nq^{\frac{4}{3}}$$

$$nq = n * \frac{\sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}}$$

$$n = \frac{120 * f}{p}$$

Logo, precisamos determinar a rotação específica (nq) e o fator (φ) que depende da construção da bomba. Neste caso, como utilizaremos uma bomba centrífuga radial, temos $\varphi = 0,0011$. Já para o cálculo da rotação específica utilizaremos a equação apresentada para determinar a rotação por minuto, dependendo da frequência da rede (f) e o número de polos (p) da bomba, onde nas condições atuais temos $f = 60Hz$ e $p = 2$ de acordo com o catálogo. Portanto, substituindo os valores nas temos:

$$n = \frac{120 * 60}{2}$$

$$n = 3600rpm$$

$$nq = 3600 * \frac{\sqrt{0,00018}}{2,3097^{\frac{3}{4}}}$$

$$nq = 25,78 \text{ rpm}$$

$$\sigma = 0,0011 * 25,78^{\frac{4}{3}}$$

$$\sigma = 0,08377$$

$$NPSH_{req} = 0,08377 * 2,3097 + \frac{1,0522^2}{2 * 9,81}$$

$$NPSH_{req} = 0,2499$$

Por fim, para verificarmos a cavitação, deve-se garantir que o NPSH disponível é maior que o NPSH requerido, logo temos:

$$NPSH_{disp} > NPSH_{req}$$

$$\frac{140 * 10^3}{1000 * 9,81} - 0 - 1,1266 - \frac{19,94 * 10^3}{1000 * 9,81} > 0,2499$$

$$11,1111 > 0,2499$$

Sendo assim, foi verificado que não haverá cavitação na aplicação.

8.4 VÁLVULA TERMOSTÁTICA

Como utilizaremos uma bomba elétrica, a vazão poderá ser controlada em função da temperatura, porém uma instalação não pode funcionar sem válvulas, então o uso de uma válvula termostática eletrônica se mostra muito interessante, pois a mesma pode servir de válvula de bloqueio, ao se fechar totalmente, e como controle de temperatura adicional, caso o sistema utilizado na bomba mostre defeito o sistema da válvula entrará em ação.

Figura 55 - Válvula eletrônica exemplo



Fonte: CANAL AGRÍCOLA, 2021.

Como observado na Figura 55 acima, vemos uma válvula eletrônica exemplo que, para melhor implementação do projeto, será utilizado.

8.5 NANOFLUIDOS

Com a demanda de energia mundial crescendo exponencialmente com o rápido progresso da tecnologia em todos os campos, as fontes alternativas estão cada vez mais em pauta por conta da busca pela alta eficiência. Um dos grandes focos dessa busca é a nanotecnologia, que tem um papel significativo nos processos de transferência de calor e energia.

Um dos usos principais da nanotecnologia é a produção de nanopartículas de alta condutividade térmica e sua mistura com fluidos base, formando os nanofluidos. As nanopartículas usadas são normalmente constituídas de metais, óxidos, carbonetos e nanotubos de carbono, enquanto os fluidos base tipicamente utilizados são água, etilenoglicol e óleo. A adição de nanopartículas sólidas aos fluidos base, que costumam ser os fluidos convencionais usados para arrefecimento, formam uma solução coloidal estável e mostram uma melhoria notável nas propriedades térmicas desses fluidos (o que acaba por permitir a diminuição do tamanho dos equipamentos de troca térmica e maior economia de energia), sendo a mais importante a condutividade térmica, que quando aumentada, provoca uma melhora na troca de calor por convecção. Tal melhoria se dá uma vez que as partículas sólidas apresentam condutividade térmica muito superior à dos líquidos, como pode ser observado na tabela abaixo:

Tabela 11 - Condutividade térmica de vários sólidos e líquidos

	Material	Thermal Conductivity (W/m-K)
Metallic solids	copper	401
	aluminum	237
Nonmetallic solids	silicon	148
	alumina (Al ₂ O ₃)	40
Metallic liquids	sodium (644 K)	72.3
Nonmetallic liquids	water	0.613
	ethylene glycol (EG)	0.253
	engine oil (EO)	0.145

Fonte: WANG; MUJUMDAR, 2008b.

As principais propriedades térmicas que afetam a transferência de calor são a condutividade térmica e a viscosidade: A condutividade térmica mede a capacidade de um fluido conduzir calor, assim sendo, um dos parâmetros mais determinantes na intensificação da transferência de calor de fluídos térmicos. Existem vários modelos teóricos que permitem prever a condutividade térmica dos nanofluidos, desde os mais simples, como os que levam em consideração as condutividades dos componentes da mistura, até os mais elaborados, como os que levam em conta as influências da temperatura, nanocamada e do movimento Browniano das nanopartículas no líquido

como o de Corcione (2011 *apud* GANJI; SABZEHMEIDANI; SEDIGHIAMIRI, 2018). A viscosidade é relacionada com a taxa de deformação de um fluido sendo caracterizada pela resistência ao movimento de um material (escoamento). Assim, a análise da viscosidade é fundamental na análise do processo de transferência de calor e da potência necessária ao bombeamento de um fluido. A relevância da viscosidade em suspensões tem estimulado a criação de modelos teóricos que a descrevam, como por exemplo o de Brinkman (1952 *apud* GANJI; SABZEHMEIDANI; SEDIGHIAMIRI, 2018), um dos mais referenciados na literatura.

Com propriedades tão efetivas em troca de calor, os campos de estudo de nanofluidos estão sendo expandidos, fazendo com que esses fluidos sejam usados em microeletrônica, células de combustível, processos farmacêuticos, motores híbridos, arrefecimento de motores, controle térmico de veículos, geladeiras domésticas, trocadores de calor etc.

Tabela 12 - Modelos utilizados na previsão das propriedades térmicas dos nanofluidos

Propriedade	Modelo	Modelo
Massa Específica	Park (1998)	$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{fb} + \phi\rho_{np}$
Calor Específico	Park (1998)	$C_{p,nf} = \frac{\phi(\rho C_p)_{np} + (1 - \phi)(\rho C_p)_{fb}}{\phi\rho_{np} + (1 - \phi)\rho_{fb}}$
Viscosidade Dinâmica	Brinkman (1952)	$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - \phi_v)^{2,5}} \mu_{fb}$
Condutividade Térmica	Corcione (2011)	$\frac{K_{nf}}{K_{fb}} = \left[1 + 4,4Re^{0,4}Pr^{0,66} \left(\frac{T}{T_{pc}} \right)^2 \left(\frac{K_{np}}{K_{fb}} \right)^{0,03} \phi^{0,66} \right]$

Fonte: GANJI; SABZEHMEIDANI; SEDIGHIAMIRI, 2018, p. 156.

Podemos observar os modelos utilizados para predição das propriedades térmicas dos nanofluidos neste trabalho na Tabela 9 apresentada anteriormente.

Na próxima tabela estão alguns tipos de nanofluidos e suas vantagens em relação aos fluidos de arrefecimento convencionais:

Tabela 13- Diferentes tipos de nanofluidos

Nanofluid	Method	Advantages
Transformer oil + Cu nanoparticle suspension	Cu nanoparticles are mixed with the transformer oil. Oleic acid is used as the dispersant to stabilize the suspension.	Enhanced heat transfer coefficient.
Water + Cu nanoparticles suspension	A suspension is created using water and 5% Cu nanoparticles. Laurate salt is used as the stabilizer.	Enhanced heat transfer coefficient.
Al ₂ O ₃ and CuO in water	Al ₂ O ₃ and CuO nanoparticles were produced by gas condensation. The nanoparticles were mixed with water and mixed well.	Enhanced heat transfer coefficient. 10% and 12% increase in thermal conductivity for Al ₂ O ₃ and CuO, respectively, were observed.
Al ₂ O ₃ in water and ethylene glycol	Alumina nanoparticles were dispersed in ethylene glycol.	Enhanced heat transfer coefficient. An 18% increase in thermal conductivity for Al ₂ O ₃ was observed.
Graphene nanolubricant	Graphene was dispersed in engine oil along with some additives.	Enhanced tribological performance.

Fonte: HOLKAR *et. al.*, 2018.

Com base nas diversas literaturas sobre nanofluidos, o selecionado para ser utilizado como fluido de arrefecimento do sistema é alumina em uma mistura de água e etilenoglicol (fluido convencional), devido ao considerável aumento na condutividade térmica do fluido.

Investigações experimentais sobre nanofluidos de Al₂O₃ e água como fluido base foram feitas em várias pesquisas e estudos, concluindo que em um escoamento laminar o coeficiente de transferência de calor aumenta de 12% a 15%, enquanto em um escoamento turbulento pode chegar a 8% de aumento.

Outro fator que influencia na condutividade térmica e, conseqüentemente, no coeficiente de troca térmica é a fração volumétrica das nanopartículas na solução e o diâmetro dessas nanopartículas. Os estudos de Pak e Cho, por exemplo, mostraram que o calor específico da solução pode diminuir de 1,1% a 2,7% se a fração volumétrica de alumina for de 1,34% a 2,78%, para partículas de 13 nm de diâmetro.

Com o que foi mencionado acima, os cálculos referentes às propriedades térmicas do nanofluido escolhido serão explicitados no item 9.1, bem como as considerações feitas

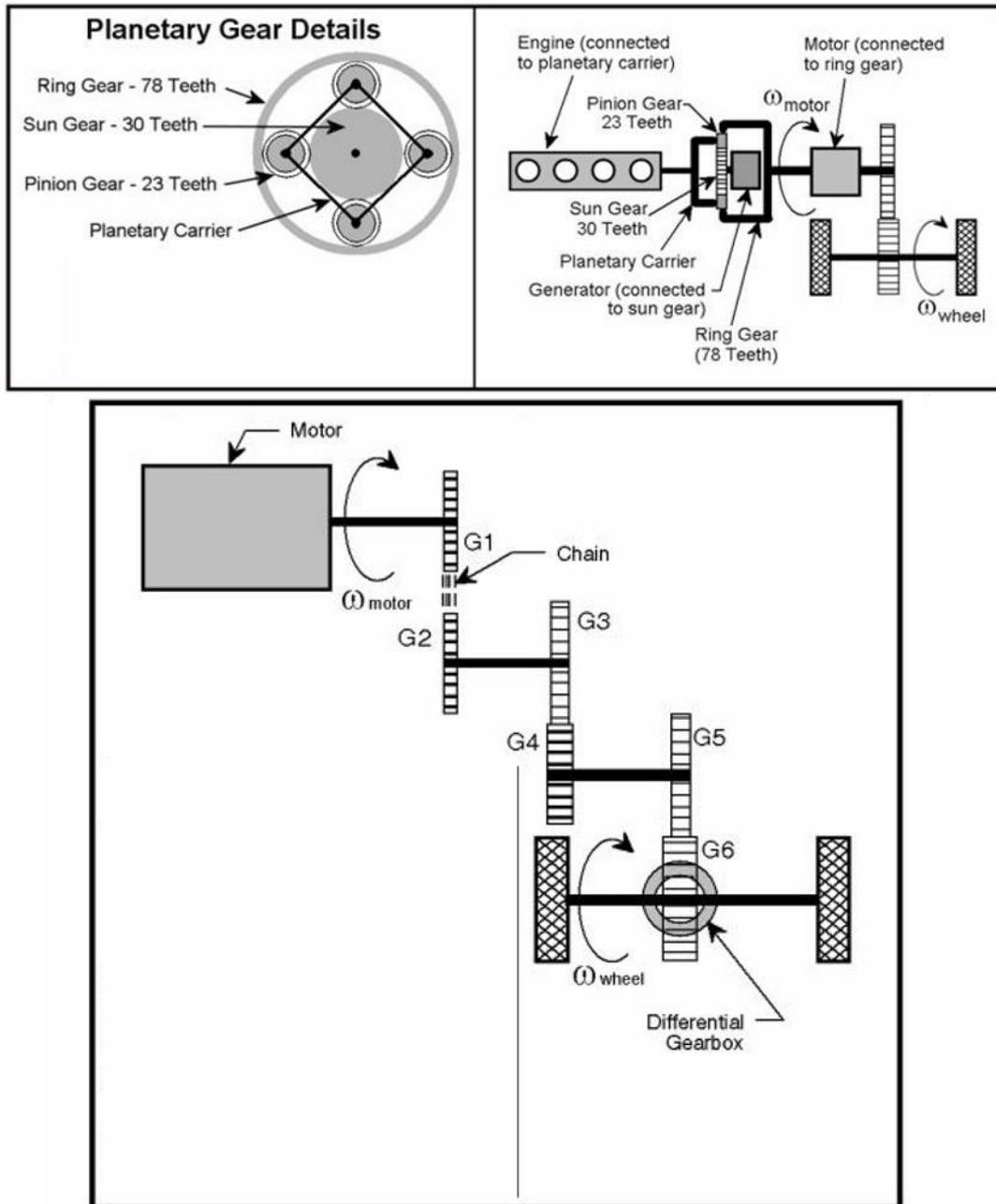
para o uso como fluido de arrefecimento veicular, uma vez que são informações pertinentes para o cálculo da melhoria e para os parâmetros de simulação.

9 CÁLCULOS DA MELHORIA

Para iniciarmos a demonstração do cálculo da melhoria, precisamos demonstrar o funcionamento do sistema, iniciando assim o entendimento do veículo utilizado para o projeto.

A transmissão de potência do *Toyota Prius* é constituída por um mecanismo chamado *Power Split Device* que consiste em um sistema epicicloidal que permite que o motor a combustão, o motor/ gerador 1 e o motor/ gerador 2 operem de forma simultânea e em diferentes rotações para garantir uma melhor eficiência. O nosso objeto de estudo neste projeto é o Motor/ Gerador 2, que possui uma rotação diretamente relacionada à rotação da roda.

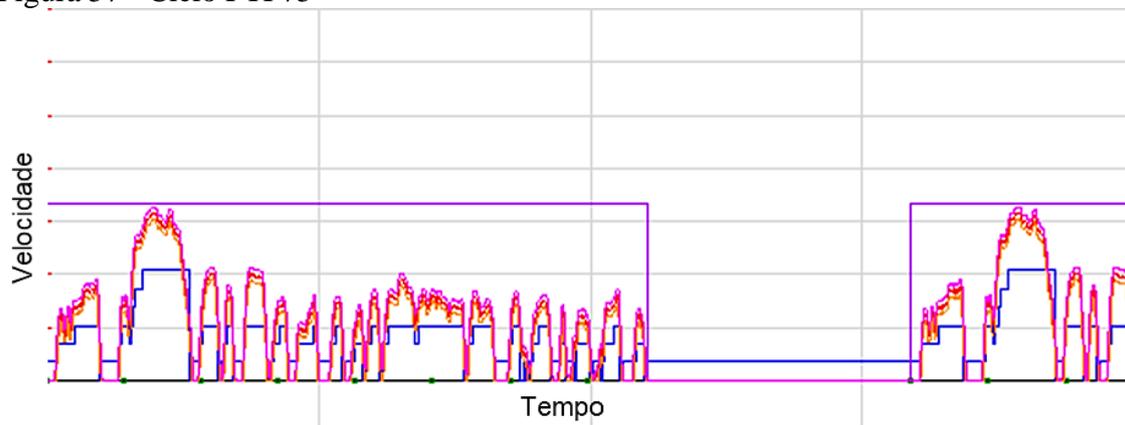
9.1 MOTOR E INVERSOR

Figura 56 - Representação do *Power Split Device* do *Toyota Prius*

Fonte: Adaptado de AYERS *et. al.*, 2004, pp. 09-10.

Para calcularmos a melhoria, utilizamos um ciclo FTP75 adotando a capacidade máxima de carga no veículo, que nos permitiu analisar um comportamento mais próximo do real, identificando a eficiência do motor e do inversor com base em uma velocidade e torque atribuídos ao ciclo.

Figura 57 - Ciclo FTP75



Fonte: retirado do *software AVL Cruise*

Tabela 14 - Dados do veículo *Toyota Prius*

Dados Veículo		
Relação do diferencial	3,1	
Raio dinâmico do pneu	0,315	m
Rendimento da transmissão	0,94	%
Rendimento do diferencial	0,92	%
Densidade do ar	1,2922	kg.m ⁻³
Cx	0,275	
Área Frontal	2,513	m ²
Fator de Resistência ao Rolamento	0,015	
Massa do veículo em Ordem de Marcha	1285	kg
Capacidade de Carga	430	kg
Aceleração da gravidade	9,81	m/s ²
Peso do veículo Carregado	1715	kg
i1a Marcha	3,0283353	
i2a Marcha	2,42266824	
i3a Marcha	1,75324675	
i4a Marcha	1,28571429	
i5a Marcha	1	
i6a Marcha	0,85553471	
i7a Marcha	0,79534884	

Fonte: Autores (Informação verbal)⁶.

Como apresentado na Tabela 14, utilizaremos os dados base para realização dos cálculos.

Com base na velocidade podemos encontrar o torque e a rotação do motor, com isso podemos identificar a eficiência de ambos os componentes nos dados obtidos por teste experimentais.

⁶ Os dados da ficha técnica da montadora foram fornecidos em aula ministrada pelo Prof, Marco Antonio Zanutti Barreto, na disciplina Transmissões 2 (12º semestre).

$$T = \frac{(F_{res} * r)}{(i_1 * i_{diff} * \epsilon_{trans} * \epsilon_{diff})}$$

Na fórmula acima, podemos encontrar o método de cálculo do Torque (N.m), que é influenciado pelas forças resistivas.

$$F_{res} = F_{acel} + F_{rol} + F_{arr}$$

$$F_{rol} = (m * g * f_{rol})$$

$$F_{acel} = \left(\frac{\Delta V}{\Delta t * 3,6} \right) * m$$

$$F_{arr} = (0,5 * A_f * C_x * \rho_{ar} * \left(\frac{V}{3,6} \right)^2)$$

Na fórmula apresentada anteriormente, podemos encontrar o método de cálculo de todas as forças resistivas, sendo elas a da força de aceleração (F_{acel}), força de resistência ao rolamento (F_{rol}), força de arrasto (F_{arr}).

$$n = \frac{(V * i_1 * i_{diff} * 60)}{(r * 2 * \pi * 3,6)}$$

Para a obtenção da rotação (rpm), utilizaremos a fórmula acima, esta que é função de uma velocidade (Km/h) e o raio da roda (m).

Considerando um ponto do ciclo FTP75, apenas para fins de exemplificação, utilizaremos uma velocidade de 89,49 Km/h, uma das maiores velocidades atingidas no ciclo, para que possamos calcular todos os dados necessários para encontrar as eficiências.

Primeiramente, utilizamos a velocidade selecionada para encontrar a rotação no eixo motriz.

$$V = \omega * r$$

$$\omega = 2 * \pi * n$$

Sendo na rotação no eixo (rpm), r o raio da roda (m), e V a velocidade (m/min), temos:

$$V = 89,49 \frac{Km}{h} = 89,49 * \frac{1000}{60} \frac{m}{min} = 1491,5 \frac{m}{min}$$

$$n_{eixo} = \frac{1491,5}{2 * \pi * 0,315} = 753,59 \text{ rpm}$$

Como a rotação do motor/ gerador 2 é função da rotação da roda, podemos encontrá-la apenas multiplicando a rotação do eixo pela relação de transmissão (FRD).

$$n_{motor} = n_{eixo} * FRD$$

$$FRD = i_1 * i_{diff}$$

$$n_{motor} = 753,59 * 3,028 * 3,1 = 7073,70 \text{ rpm}$$

Para encontrarmos o torque, primeiro realizaremos os cálculos das forças resistivas.

$$F_{rol} = (1715 * 9,81 * 0,015) = 252,36 \text{ N}$$

$$F_{acel} = \left(\frac{90,12 - 89,48}{1 * 3,6} \right) * 1715 = 304,89 \text{ N}$$

$$F_{arr} = \left(0,5 * 2,513 * 0,275 * 1,2922 * \left(\frac{80,49}{3,6} \right)^2 \right) = 275,85 \text{ N}$$

$$F_{res} = 252,36 + 304,89 + 275,85 = 833,12 \text{ N}$$

$$T = \frac{(833,12 * 0,315)}{(3,0283 * 3,1 * 0,94 * 0,92)} = 32,33 \text{ Nm}$$

Entrando com esses dados nos mapas de eficiência, assim temos:

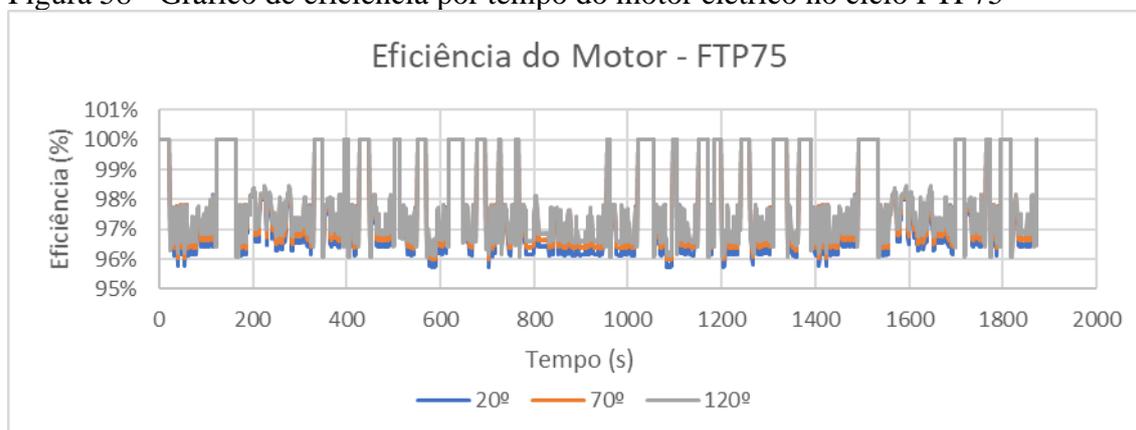
Tabela 15 - Representação das eficiências com os cálculos apresentados

Tempo (s)	Velocidade (km/h)	Força Resistiva Carregado (N)	Torque R. Carregado (Nm)	Rotação (rpm)	20°			70°			120°		
					Motor	Inversor	Conjunto	Motor	Inversor	Conjunto	Motor	Inversor	Conjunto
281	90,12	833,12	32,33	7073,70	97,85%	99,01%	96,88%	98,00%	98,95%	96,97%	98,08%	98,82%	96,92%

Fonte: Autores.

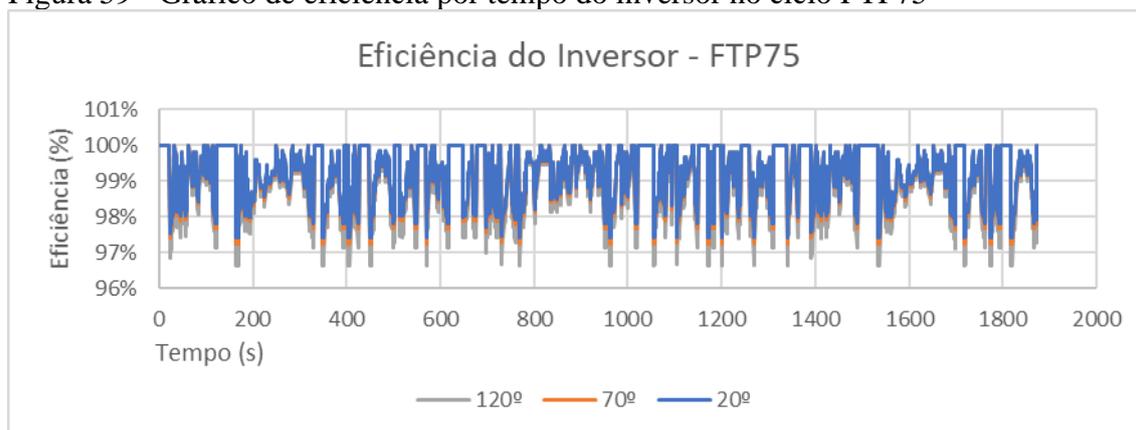
Utilizando os dados obtidos nos testes realizados para o estudo *Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System*, realizado pelo *Oak Ridge National Laboratory*, desenvolvemos os gráficos de eficiência do motor e inversor para o ciclo FTP75.

Figura 58 - Gráfico de eficiência por tempo do motor elétrico no ciclo FTP75



Fonte: Autores.

Figura 59 - Gráfico de eficiência por tempo do inversor no ciclo FTP75



Fonte: Autores.

Analisando o motor e o inversor operando nas temperaturas de 20°C, 70°C e 120°C dentro do ciclo FTP75, calculamos as eficiências para cada temperatura adotando uma normalização de torque e rotação para que fosse possível utilizar os mapas de eficiência.

Tabela 16 - Eficiências médias do sistema no ciclo em diferentes temperaturas

Temperatura	Efic Motor	Efic Inversor	Efic Conjunto
20°C	97,54%	99,18%	96,75%
70°C	97,64%	99,14%	96,81%
120°C	97,73%	98,98%	96,75%

Fonte: Autores.

Como nosso sistema nos permite trabalhar com diferentes temperaturas em cada componente, podemos utilizar os melhores casos para calcular uma eficiência do conjunto com a melhoria aplicada.

Tabela 17 - Demonstração da melhor situação no ciclo

Melhor situação: Motor 120°C e Inversor 20°C		
Motor	Inversor	Conjunto
97,73%	99,18%	96,94%

Fonte: Autores

Sendo assim, a pior situação será com o motor a 20° e o inversor a 120°:

Tabela 18 - Demonstração da pior situação no ciclo

Pior Situação: Motor 20°C e Inversor 120°C		
Motor	Inversor	Conjunto
97,54%	98,98%	96,55%

Fonte: Autores

Se compararmos a melhoria com a pior situação apresentada, atingimos uma melhora de 0,39% na eficiência do conjunto, o que reflete em um aumento de 1,62 Km de autonomia, considerando um veículo que apresente autonomia média de 416 Km.

Comparamos também a eficiência para duas ordens de marcha diferentes (1ª e 2ª), porém não obtivemos muita diferença em relação à eficiência.

9.2 FLUIDO DE ARREFECIMENTO: NANOFLUIDO

Como discutido no item 8.5, um dos pontos abordados para a melhoria do sistema de arrefecimento é a mudança do fluido de arrefecimento convencional, mistura de 50% água e 50% etilenoglicol, para um nanofluido que tem como fluido base a mesma mistura e nanopartículas de alumina.

A nanopartícula em questão tem diâmetro de 30 nm, valor mais utilizado nos estudos realizados, e estará presente em fração volumétrica de 0,055, condição que atende a proposta de aumento de troca térmica do fluido, de acordo com os artigos mencionados na fundamentação teórica.

Assim, para o fluido base tem-se os seguintes dados:

- a) Condutividade térmica $k = 0,4151 \text{ W/m.K}$;
- b) Calor específico a pressão constante $C_p = 3681,92 \text{ J/kg.K}$;
- c) Massa específica $\rho = 1015,57 \text{ kg/m}^3$;
- d) Viscosidade dinâmica $\mu = 0,000744 \text{ Pa.s}$;
- e) Temperatura do ponto de congelamento $T_{pc} = -36,8^\circ \text{ C} = 236,2 \text{ K}$.

E para a nanopartícula de Al_2O_3 de diâmetro 30 nm:

- a) Condutividade térmica $k = 40 \text{ W/m.K}$;
- b) Calor específico a pressão constante $C_p = 729 \text{ J/kg.K}$;
- c) Massa específica $\rho = 3880 \text{ kg/m}^3$.

Seguindo os modelos matemáticos apresentados na Tabela 14, é possível calcular as propriedades para o nanofluido escolhido (nas equações, os índices “nf”, “fb”, “np” e “pc” indicam nanofluido, fluido base, nanopartícula e ponto de congelamento, em ordem).

De Park (1998 *apud* GANJI; SABZEHMEIDANI; SEDIGHIAMIRI, 2018), têm-se a nova massa específica:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \cdot \rho_{fb} + \phi \cdot \rho_{np}$$

$$\rho_{nf} = (1 - 0,055) \cdot 1015,57 + 0,055 \cdot 3880$$

$$\rho_{nf} = 1173,11 \text{ kg/m}^3$$

E, também, o calor específico:

$$C_{p,nf} = \frac{\phi \cdot (\rho \cdot C_p)_{np} + (1 - \phi) \cdot (\rho \cdot C_p)_{fb}}{\phi \cdot \rho_{np} + (1 - \phi) \cdot \rho_{fb}}$$

$$C_{p,nf} = \frac{0,055 \cdot (3880,729) + (1 - 0,055) \cdot (1015,57 \cdot 3681,92)}{0,055 \cdot 3880 + (1 - 0,055) \cdot 1015,57}$$

$$C_{p,nf} = 3144,76 \frac{J}{kg \cdot K}$$

Dos estudos de Brinkman (1952 *apud* GANJI; SABZEHMEIDANI; SEDIGHIAMIRI, 2018), calcula-se a viscosidade dinâmica:

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2,5}} \cdot \mu_{fb}$$

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - 0,055)^{2,5}} \cdot 0,00074$$

$$\mu_{nf} = 0,00086 Pa \cdot s$$

Por último, das conclusões de Corcione (2011 *apud* GANJI; SABZEHMEIDANI; SEDIGHIAMIRI, 2018), tem-se a condutividade térmica:

$$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = [1 + 4,4 \cdot Re^{0,4} \cdot Pr^{0,66} \cdot \left(\frac{T}{T_{PC}}\right)^2 \cdot \left(\frac{k_{np}}{k_{fb}}\right)^{0,03} \phi^{0,66}]$$

Porém, como a condutividade térmica está relacionada com o número de Reynolds, é necessário calcular os valores da condutividade em duas condições: quando o escoamento acontece na tubulação e quando ele acontece no radiador, uma vez que o Reynolds depende da velocidade de escoamento e do diâmetro da tubulação em que ele ocorre.

Vale ressaltar que os números de Reynolds e Prandtl foram calculados utilizando apenas as propriedades do fluido base (mistura 50% água e 50% etilenoglicol), na condutividade térmica, a temperatura de congelamento usada é a do fluido base e nas relações entre vazões e cálculo da velocidade a massa específica também é a do fluido convencional, uma vez que a fração volumétrica das partículas de alumina é muito pequena, permitindo essa consideração.

Para a tubulação, os dados são os seguintes:

- a) Diâmetro de 0,015 m, dimensionado no item 7.3, correspondendo a uma seção transversal de área $1,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$;
- b) Vazão volumétrica de 10,6 l/min, ou seja, $1,77 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, que multiplicada pela massa específica do fluido base, resulta na vazão mássica de 0,179 kg/s.

Com tal vazão mássica e sabendo que ela também é resultado do produto da massa específica, da velocidade de escoamento e da área da seção transversal da tubulação, tem-se:

$$v = \frac{Q_m}{\rho \cdot A} = \frac{0,179}{1015,57 \cdot 1,8 \cdot 10^{-4}} = 0,99 \text{ m/s}$$

Com a velocidade calculada acima e o diâmetro da tubulação, o Reynolds para essa porção do escoamento é:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1015,57 \cdot 0,99 \cdot 0,015}{0,00074} = 20459,18$$

Caracterizando um escoamento turbulento.

Já o número de Prandtl pode ser calculado da seguinte maneira:

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k} = \frac{0,00074 \cdot 3681,92}{0,4151} = 6,6$$

Assim, considerando que a temperatura média que o fluido de arrefecimento sai do radiador e entra na tubulação é de 70° C , 343 K, a condutividade térmica do nanofluido na tubulação é:

$$\frac{k_{nf}}{0,4151} = [1 + 4,4 \cdot 20459,18^{0,4} \cdot 6,6^{0,66} \cdot \left(\frac{343}{236,2}\right)^2 \cdot \left(\frac{40}{0,4151}\right)^{0,03} \cdot 0,055^{0,66}]$$

$$k_{nf} = 120,38 \frac{W}{m \cdot K}$$

Analisando a condutividade térmica resultante isoladamente, é óbvio que o valor é absurdamente alto, mas é importante levar alguns pontos em consideração: o modelo

matemático usado nos cálculos é amplamente conhecido e utilizado, entretanto é um modelo empírico e pode ser que ele não represente fielmente o comportamento do nanofluido selecionado: a fórmula permite chegar nesse resultado matemático, mas esse valor pode não corresponder ao comportamento térmico real, ou seja, a partir de um certo momento, por mais que a condutividade térmica do fluido aumente, a diferença de temperatura propiciada pela troca térmica não vai aumentar.

De qualquer maneira, a capacidade de troca térmica, como melhoria, será validade no item 9 através das simulações.

Para o radiador, o número de Prandtl será o mesmo que na tubulação, uma vez que ele só depende das propriedades do fluido, então, só é necessário recalcular o Reynolds. Entretanto, nesse caso, é preciso fazer mais uma consideração: no radiador, o fluido não escoará por uma tubulação cilíndrica, assim, é preciso calcular primeiramente o diâmetro hidráulico.

Considerando a seção transversal retangular, de altura $a = 2$ mm e largura $b = 50$ mm, tem-se:

$$D_H = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 50}{2 + 50} = 3,846 \text{ mm} = 0,0038 \text{ m}$$

A velocidade do escoamento dentro do radiador é encontrada de forma análoga a da tubulação, mas ao entrar no radiador, a vazão do fluido de arrefecimento se divide entre todos os tubos, $n = 62$, fazendo-se necessário considerar essa configuração no cálculo da velocidade. Então:

$$v = \frac{Q_m}{\rho \cdot A \cdot n} = \frac{0,179}{1015,57 \cdot 100 \times 10^{-6} \cdot 62} = 0,028 \text{ m/s}$$

Fazendo com que o número de Reynolds seja:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1015,57 \cdot 0,028 \cdot 0,0038}{0,00074} = 149,23$$

O que caracteriza um escoamento laminar.

Assim, considerando que a temperatura média que o fluido de arrefecimento tem dentro do radiador é de 69,5° C, 342,5 K, a condutividade térmica do nanofluido nessa situação é:

$$\frac{k_{nf}}{0,4151} = [1 + 4,4 \cdot 149,23^{0,4} \cdot 6,6^{0,66} \cdot \left(\frac{342,5}{236,2}\right)^2 \cdot \left(\frac{40}{0,4151}\right)^{0,03} \cdot 0,055^{0,66}]$$

$$k_{nf} = 17,12 \frac{W}{m.K}$$

Dentro do radiador, a condutividade térmica é um valor completamente aceitável para um nanofluido, mas como mencionado anteriormente, a capacidade de troca térmica será verificada nas simulações apresentadas no item 10.

10 MODELAMENTO DA SIMULAÇÃO

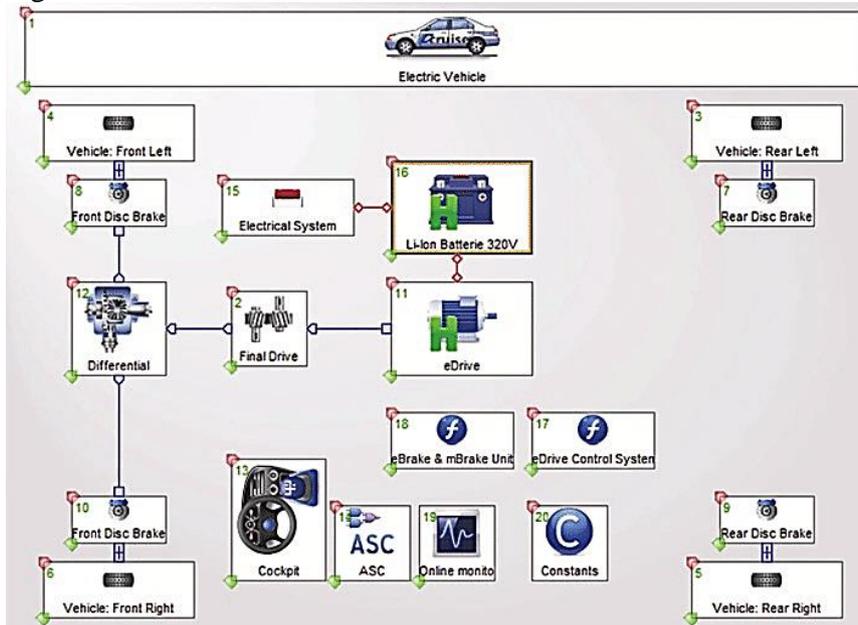
Para que possamos validar as considerações e cálculos apresentados no projeto, devemos realizar testes/simulações computacionais, sendo a única forma de verificação do projeto, pois o uso de modelos reais se torna inviável pelo preço dos sistemas, pela dificuldade de acesso a tecnologias e pela dificuldade gerada pela pandemia da COVID-19 nos anos de 2020 e 2021.

10.1 AVL CRUISE

Com o intuito principal sendo a verificação do target e a análise de ganhos provenientes da alteração da eficiência global do veículo, o grupo realizou diversas simulações no ambiente computacional do software *AVL Cruise*, sendo a *AVL* a maior empresa independente do mundo para o desenvolvimento, simulação e teste de sistemas de *powertrain*, e especificamente o *AVL Cruise* é uma solução flexível de simulação de transmissão de veículos, que oferece suporte a uma ampla gama de aplicações. Isso inclui a análise do conceito de trem de força no ambiente de escritório, bem como aplicativos em tempo real, como *Hardware-in-the-Loop* (HiL), *Software-in-the-Loop* (SiL) e modelos de plantas de teste.

Para que seja iniciada a simulação, devemos aderir um veículo base para o estudo, pois este realizará os ciclos de teste e será sobre ele que alteraremos suas características em um ambiente controlado e que permite repetibilidade. O veículo em questão utilizado foi o veículo elétrico padrão do *software*.

Figura 60 - Veículo elétrico base



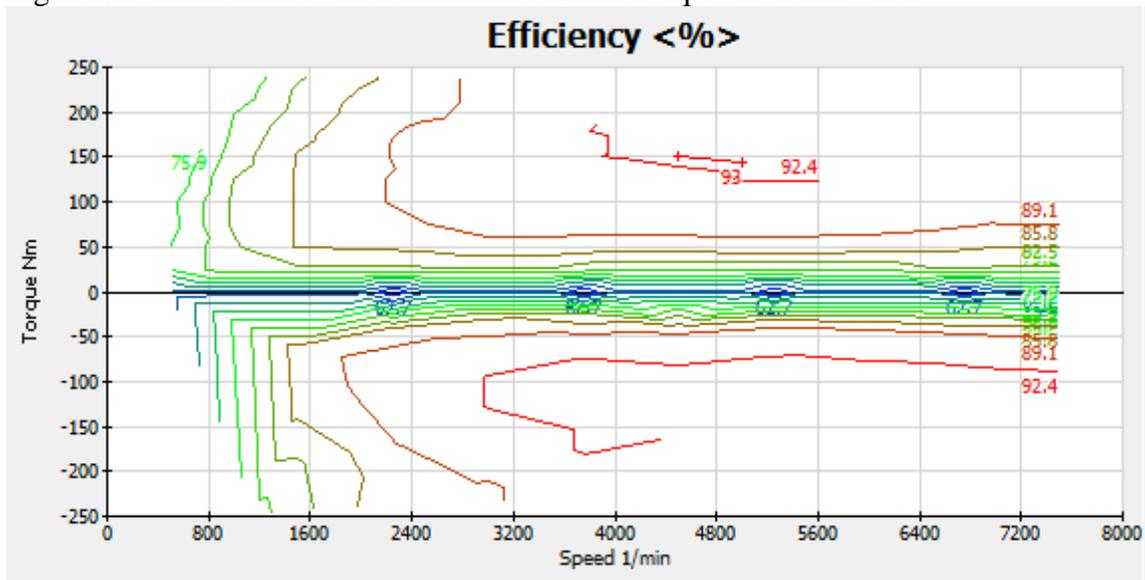
Fonte: Autores.

Figura 61 - Dados do veículo base

Nominal Weight			
Curb Weight	<input type="text" value="1200,0"/>	kg	Gross Weight <input type="text" value="1560,0"/>
			kg
Inertia Moment	<input type="text" value="0,1431"/>	kg*m ²	
Wheel Slip			
Friction Coefficient of Tire	<input type="text" value="1,0"/>		
Reference Wheel Load	<input type="text" value="3260,0"/>	N	Wheel Load Correction Coefficient <input type="text" value="0,0"/>
Vehicle Body Dimensions			
Distance from Hitch to Front Axle	<input type="text" value="2467,0"/>	mm	Wheel Base <input type="text" value="2467,0"/>
			mm
Height of Support Point at Bench Test	<input type="text" value="500,0"/>	mm	Distance from PFA to Front Axle <input type="text" value=""/>
			mm
Air Coefficient			
Frontal Area	<input type="text" value="1,97"/>	m ²	Drag Coefficient <input type="text" value="0,284"/>
			Drag Area <input type="text" value=""/>
			m ²
Lift Coefficient Front Axle	<input type="text" value="0,032"/>	Lift Coefficient Rear Axle <input type="text" value="0,01"/>	
Static Rolling Radius			
Static Rolling Radius	<input type="text" value="287,0"/>	mm	Circumference <input type="text" value="1803,27"/>
			mm
Dynamic Rolling Radius (constant)			
Dynamic Rolling Radius	<input type="text" value="301,0"/>	mm	Circumference <input type="text" value="1891,24"/>
			mm

Fonte: Autores.

Figura 62 - Eficiência do motor mais inversor x Torque do veículo base

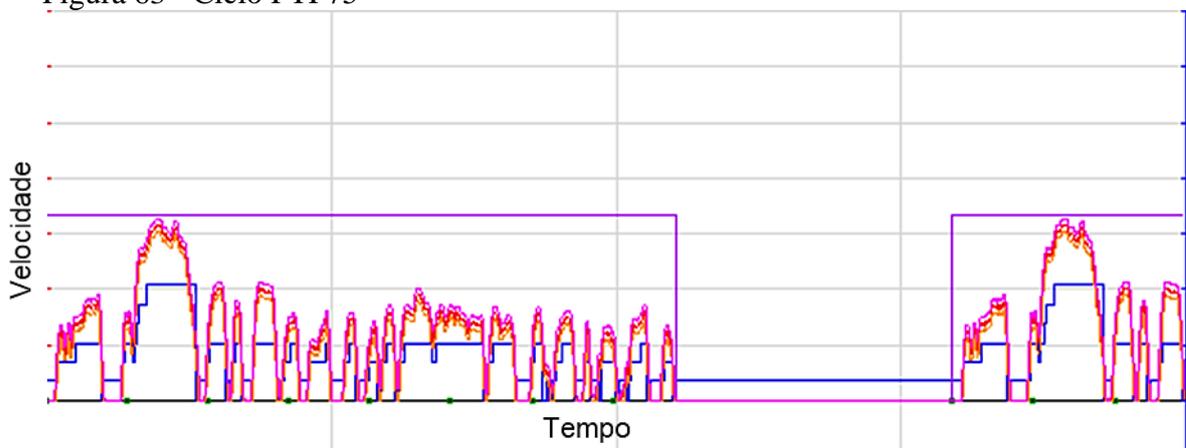


Fonte: Autores.

Podemos observar, então, nas Figuras 60, 61 e 62, as características do carro analisado, vamos então focar os nossos estudos no gráfico de eficiência do mesmo, pois este será alterado para as análises.

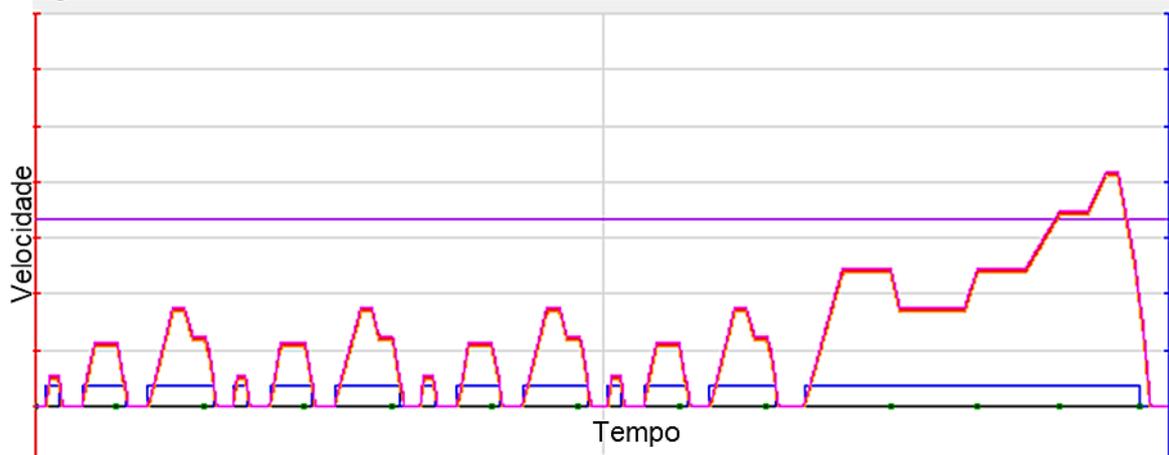
Para o melhor entendimento do processo de testes, torna-se necessário apresentar os ciclos impostos sobre o veículo, sendo eles o ciclo FTP75 (*Federal Test Procedure*), e o NEDC (*New European Driving Cycle*) onde são ciclos usados para certificação de emissão e teste de economia de combustível nos Estados Unidos e na Europa, respectivamente.

Figura 63 - Ciclo FTP75



Fonte: Autores.

Figura 64 - Ciclo NEDC



Fonte: Autores.

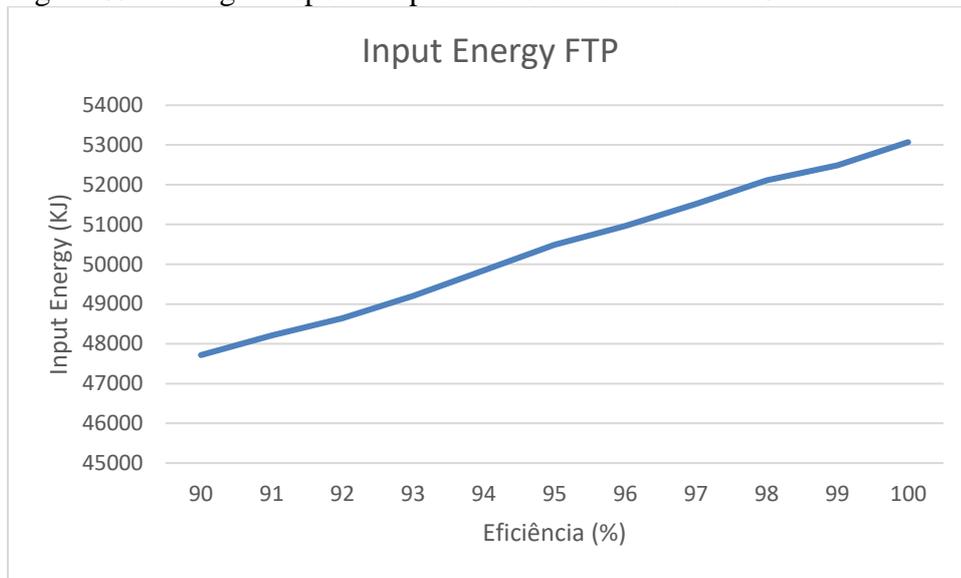
Podemos observar, nas Figuras 63 e 64 acima, o comportamento imposto sobre o veículo durante os testes. Para o estudo do range do veículo, este foi imposto por inúmeros ciclos em sequência para verificar a distância percorrida.

Com o conteúdo apresentado, vamos considerar o veículo base como a melhor condição possível, portanto o motor e o inversor trabalham em sua temperatura ideal conseguindo a melhor eficiência possível em todos os pontos do ciclo, e assim para a análise alteraremos o mapa de eficiência do motor e inversor para verificarmos se haverá mudança na distância percorrida, energia de entrada no motor e nas perdas deste sistema.

No target imposto pelo grupo o veículo com o aumento na eficiência do motor e do inversor em 1,5% e 1% respectivamente, deve-se obter uma melhora na autonomia de 3,36% no veículo, portanto nos testes iremos pegar o veículo com a sua eficiência máxima, 100% de eficiência, e degradaremos até 90% de eficiência, cada teste com 1% de degradação, verificando os resultados obtidos.

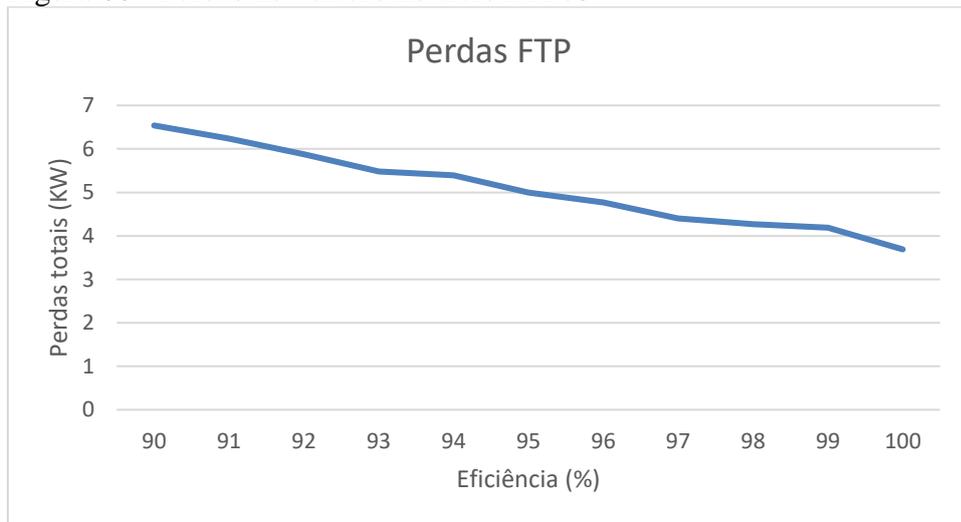
Para o ciclo FTP75, temos:

Figura 65 - Energia disponível para o motor no ciclo FTP75



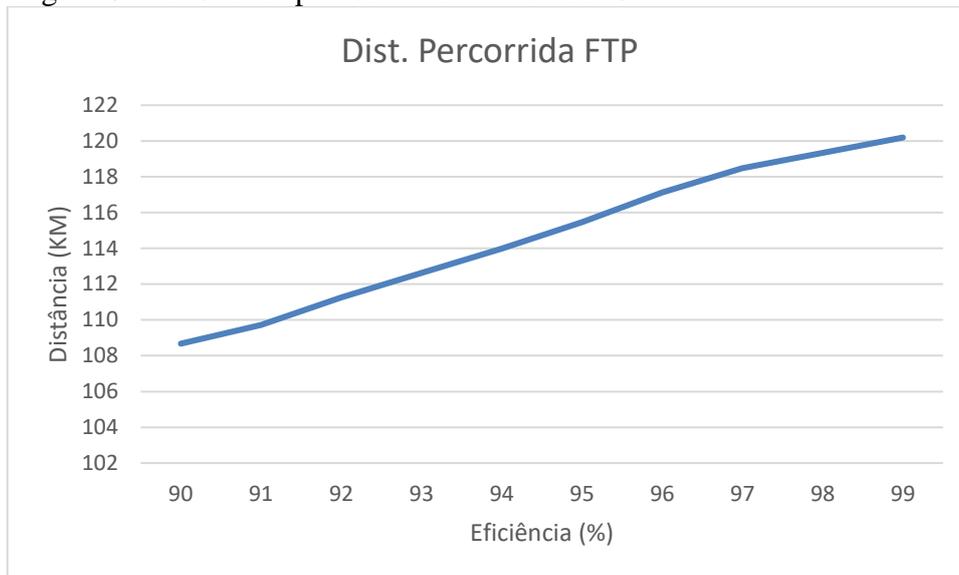
Fonte: Autores.

Figura 66 - Perdas no veículo no ciclo FTP75



Fonte: Autores.

Figura 67 - Distância percorrida no ciclo FTP75

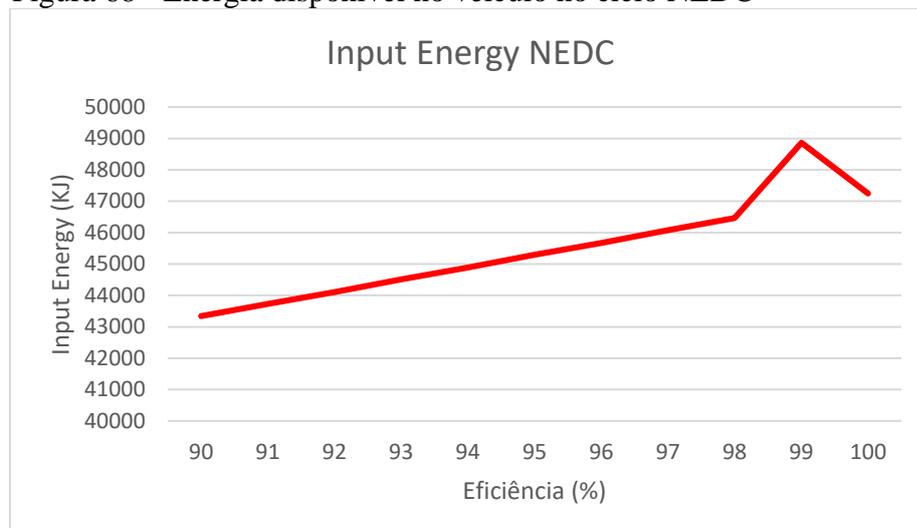


Fonte: Autores.

Portanto, observamos nas Figuras 65, 66 e 67 que com a melhoria da eficiência do motor mais inversor comparando 90% e 100%, vemos que temos um aumento de 11,22% na energia disponível para o motor, um ganho de 11,26% na autonomia do veículo e uma diminuição de 43,58% nas perdas destes dois componentes, e se olharmos o target imposto no veículo temos indo de 97% a 100%, com uma melhora de 3,01% na energia disponível para o motor, uma melhora de 2,61% na autonomia e diminuição 16,14% das perdas deste sistema.

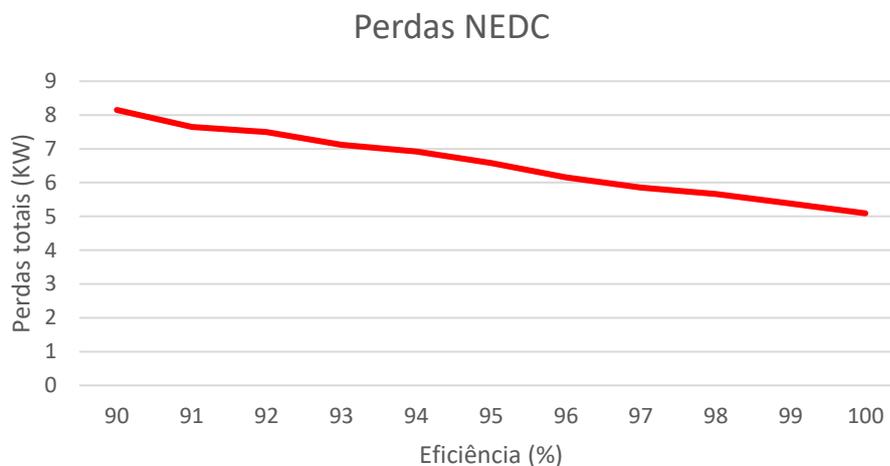
Para o ciclo NEDC, temos:

Figura 68 - Energia disponível no veículo no ciclo NEDC



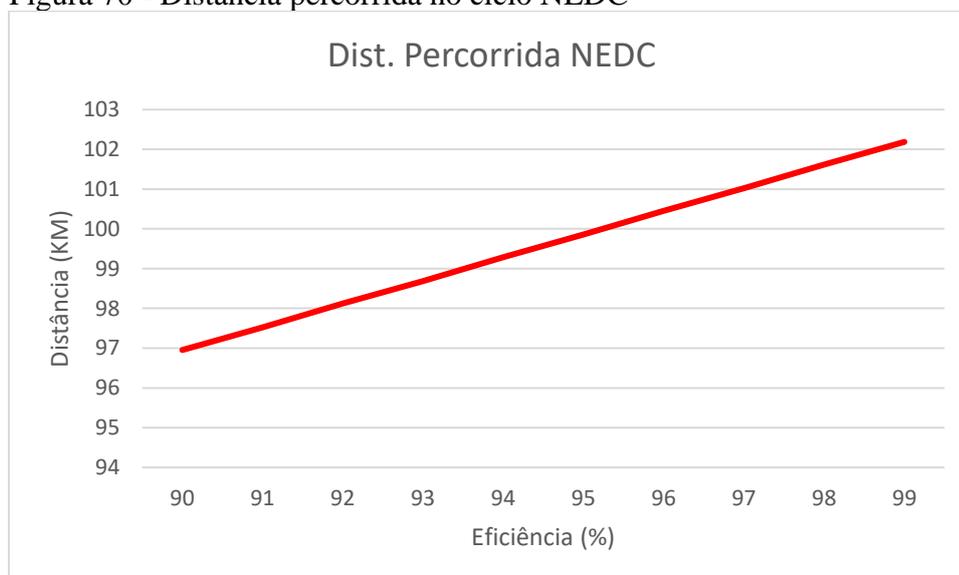
Fonte: Autores.

Figura 69 - Perdas no veículo no ciclo NEDC



Fonte: Autores.

Figura 70 - Distância percorrida no ciclo NEDC



Fonte: Autores.

Assim, observamos nas Figuras 68, 69 e 70 que com a melhoria da eficiência do motor mais inversor comparando 90% e 100% vemos que temos um aumento de 9,01% na energia disponível para o motor, um ganho de 6,02% na autonomia do veículo e uma diminuição de 37,52% nas perdas destes dois componentes, e se olharmos o target imposto no veículo temos indo de 97% a 100%, temos uma melhora de 2,53% na energia disponível para o motor, uma melhora de 1,72% na autonomia e diminuição 13,00% das perdas deste sistema.

Portanto, conclui-se que ao garantir que o sistema trabalhe majoritariamente em sua temperatura ideal, a eficiência do veículo será beneficiada, e, com isso, há sim o aumento na autonomia do veículo e as perdas do sistema são minimizadas de maneira

positiva, mostrando assim que a ideia do projeto é correta e de grande importância para o veículo.

10.2 ANSYS: FLUENT

O ANSYS é um software de elementos finitos que é utilizado em diversas classes de engenharia para a resolução de problemas encontrados na área. Uma das opções do software ANSYS é o ANSYS CFX que resolve, numericamente, as equações da dinâmica dos fluidos e transferência de calor para praticamente qualquer geometria e condição de escoamento.

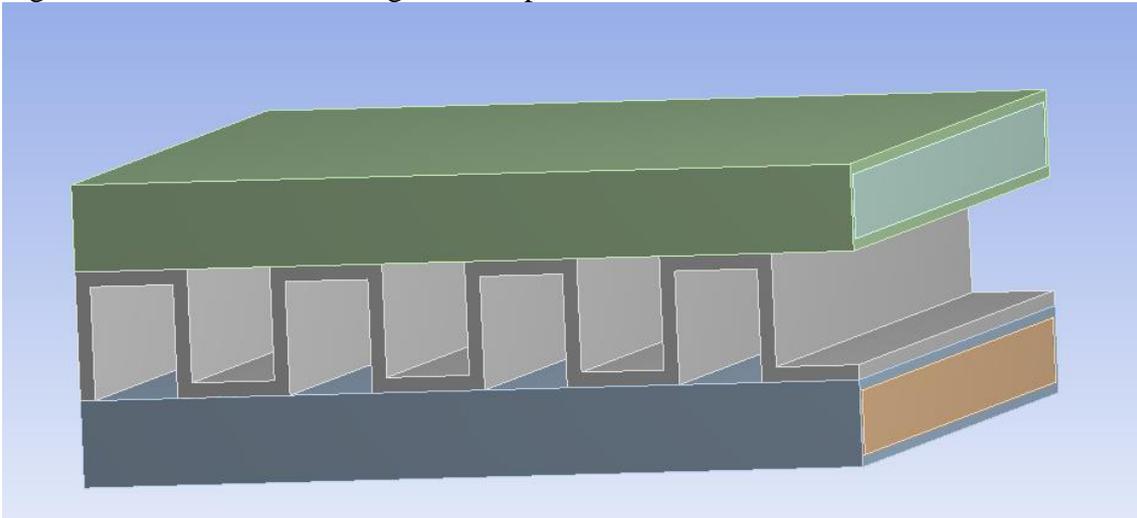
Com isso, para estudo da troca de calor das aletas é necessária a realização de simulações do radiador dedicado do motor elétrico e do inversor para que seja modelada a informação de saída que o projeto almeja alcançar. Nesse caso, a temperatura que servirá como dado de entrada para o motor elétrico e o inversor, de modo que operem com a maior eficiência. Esse dado de saída necessitará ser resolvido pela utilização de equações de transferência de calor.

Para a simulação foram utilizados os seguintes procedimentos:

10.2.1 Preparação da geometria padrão

Para que o radiador 3D seja simulado pelo software ANSYS, seria necessário vários clusters de computadores para chegar em um resultado mais próximo do real que é o objetivo da simulação. No caso proposto pelo grupo, se baseando nos costumes da indústria, foi desenhado apenas uma pequena parte do radiador para obter uma malha mais refinada, assim tendo um resultado assertivo na simulação, na qual tem como objetivo medir a troca de calor e o comportamento dos fluidos.

Figura 71 - Vista em corte da geometria padrão



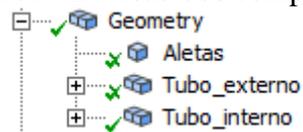
Fonte: Autores.

10.2.2 Criação da malha

10.2.2.1 Geometria

Na parte de geometria para ajudar com as condições de malha, o grupo dividiu o sólido em três principais grupos: aletas, tubos internos (onde seria o domínio do fluido) e tubo externo.

Figura 72 - Divisão dos componentes

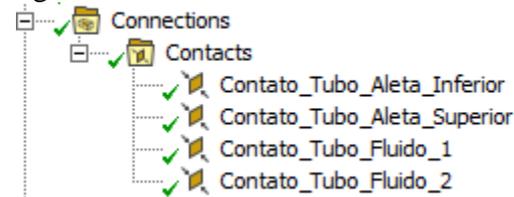


Fonte: Autores.

10.2.2.2 Conexões

Para o ANSYS reconhecer cada parte conectada do radiador, foi feito um contato manual, selecionando os contatos entre a parte interna e externa do tubo, entre tubo externo e aletas, totalizando 4 conexões, para garantir que o *software* reconheça cada parte do modelo onde terá troca de calor por condução.

Figura 73 - Conexões



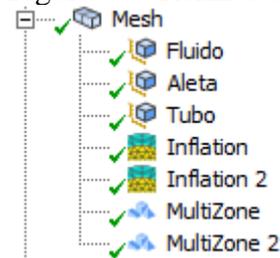
Fonte: Autores.

10.2.2.3 Mesh

Para a condição de meshing, foi utilizado *Patch Conforming Method* nas geometrias de aleta e domínio do fluido (parte interna do tubo), sendo utilizado o método multizone para simular o escoamento do fluido. O multizone se utiliza de estruturas hexaédricas em blocos que possibilita um tempo de processo menor e uma precisão de análise maior.

No *inflation*, foram utilizadas 15 divisões sendo o primeiro elemento de espessura igual a 0,001 mm deixando o modelo preciso suficiente para capturar o comportamento da camada limite do fluido.

Figura 74 - Refinos do Mesh



Fonte: Autores.

Tabela 19 - Tamanho dos elementos

Componente	Element Size
Aletas	0,2 mm
Tubo	0,8 mm
Escoamento do fluido	0,005 mm

Fonte: Autores.

O grupo definiu o tamanho dos elementos a ser usado pelo software, como podemos ver na Tabela 19 acima.

Para os demais parâmetros, utilizamos a física de CFD e, como todo o sistema foi modelado no *Fluent*, este foi escolhido como o método de simulação. Com isso, o resultado foi uma malha de aproximadamente 5 milhões de elementos.

Figura 75 - Número de elementos e nódulos

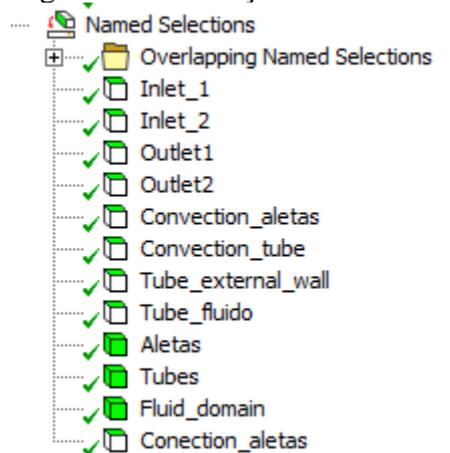
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	5160344
<input type="checkbox"/> Elements	5004470

Fonte: Autores.

10.2.2.4 Condições de contorno

Para garantir as condições de contorno, foram nomeadas partes do modelo, dividindo em parte de convecção, parte de tubos, aletas, entradas e saídas do fluido e as conexões. Foram utilizadas duas entradas e duas saídas para garantir a melhor condição de simulação.

Figura 76 - Condições de contorno

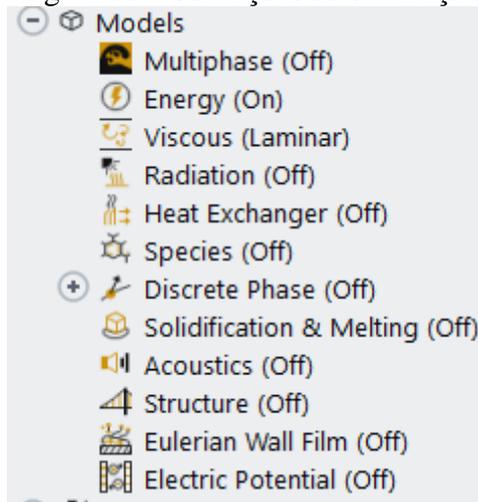


Fonte: Autores.

10.2.3 *Fluent*

Para a ferramenta de análise de fluxo, foi escolhida o *Fluent*, pois este nos possibilita determinar as trocas térmicas entre os componentes, a escolha do material do fluido e do sólido, a vazão de fluido e todas as condições definidas pelo grupo.

Figura 77 - Condições de simulação



Fonte: Autores.

10.2.3.1 Criação do fluido base

Para simular o nosso modelo, entramos com as propriedades do nosso fluido base (água-etilenoglicol) e as propriedades do nosso fluido de melhoria, o nanofluido.

Figura 78 - Condições do nanofluido

Density (kg/m ³)	constant	Edit...
	1262.4	
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	constant	Edit...
	2150.78	
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant	Edit...
	17.12	
Viscosity (kg/m-s)	constant	Edit...
	0.01947	

Fonte: Autores.

Figura 79 - Condições do fluido 50-50 água e etilenoglicol

Density (kg/m ³)	constant	Edit...
	1015.57	
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	constant	Edit...
	3681	
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant	Edit...
	0.4157	
Viscosity (kg/m-s)	constant	Edit...
	0.000744	

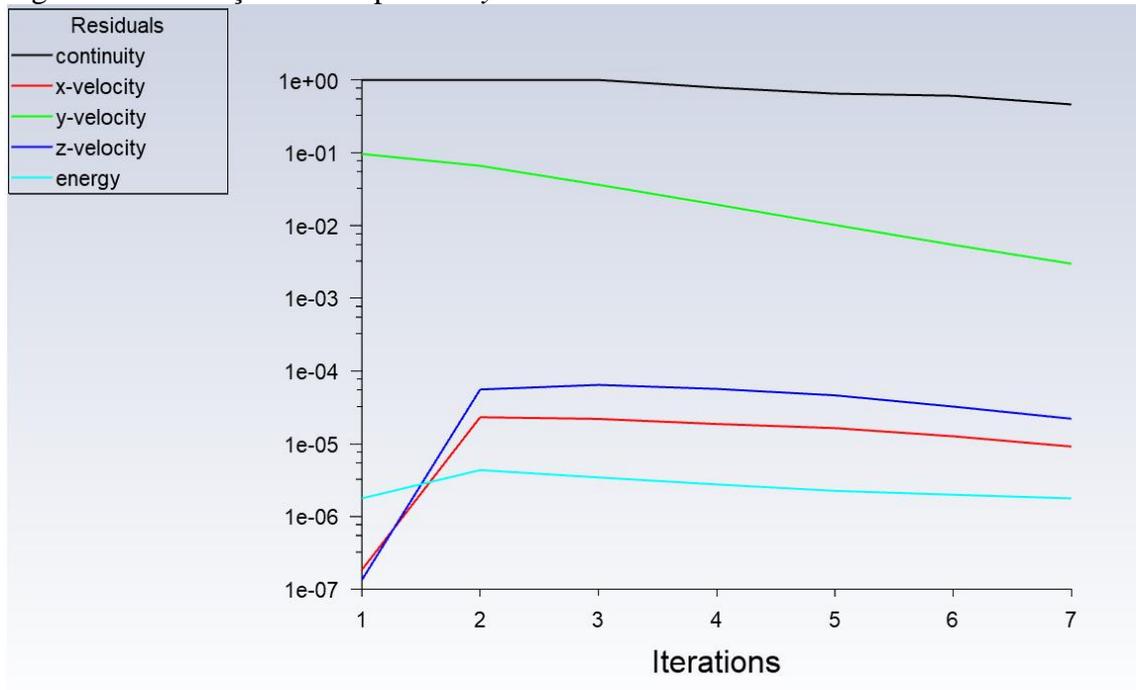
Fonte: Autores.

10.2.3.2 Condições de contorno

Foram consideradas as condições de contorno a seguir visando uma situação extrema de funcionamento do radiador para descobrir quanto o nosso radiador dimensionado é capaz de trocar calor nessa condição.

- Vazão mássica = 0.1828 kg/s;
- T = 120°C (temperatura na entrada do tubo);
- H_{conv} = 60 W/m²K;
- T_{amb} = 35°C.

Logo após, foram feitos os cálculos pelo software convergindo na interação X.

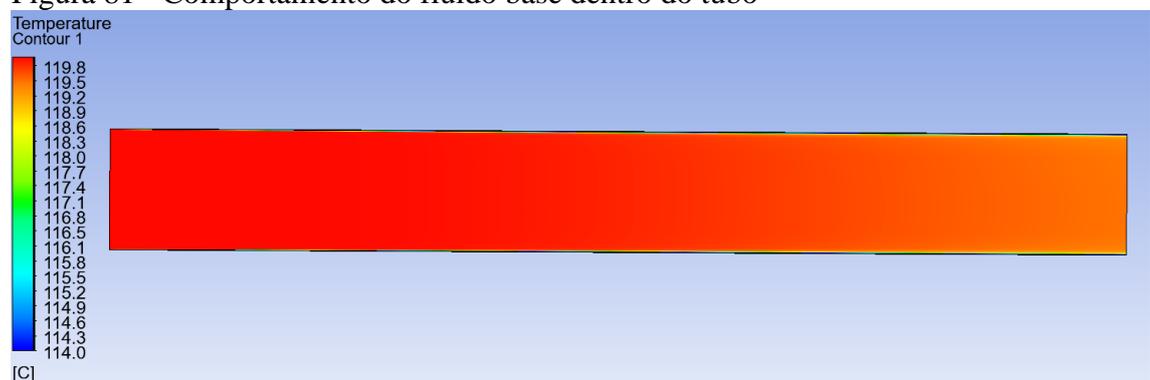
Figura 80 - Interações feitas pelo *ansys*

Fonte: Autores.

10.2.4 Resultados

Através de simulações no radiador dedicado, foram obtidos resultados visuais de seu comportamento durante a troca de calor entre o fluido de arrefecimento e as aletas, sendo depois feita uma segunda simulação, alterando o fluido de arrefecimento da mistura de água e etilenoglicol para nanofluido.

Figura 81 - Comportamento do fluido base dentro do tubo

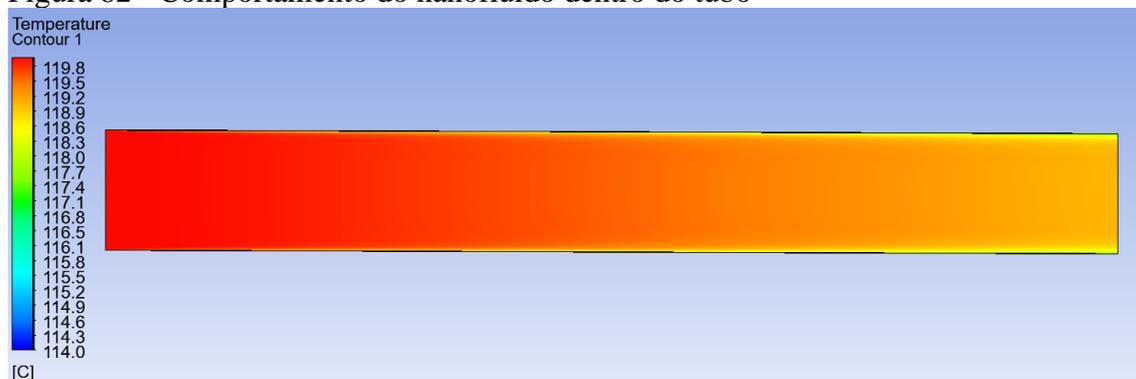


Fonte: Autores.

Pode-se perceber uma queda de temperatura de 1°C concentrada nas paredes dos tubos, se tornando mais visível enquanto se aproxima da saída. Percebem-se, nas paredes do tubo, pequenos indícios da redução térmica. Considerando que o radiador perde uma

pequena parcela na troca de calor nos tubos, é possível analisar que em um sistema com 62 tubos seria suficiente para realizar a troca de calor deixando o radiador com a temperatura final próxima dos 100°C.

Figura 82 - Comportamento do nanofluido dentro do tubo



Fonte: Autores.

Com a utilização do nanofluido, onde temos uma maior condutividade térmica é possível analisar a imagem e perceber que a troca de calor foi otimizada para um único tubo, alcançando 2°C na saída. Considerando que o radiador perde uma pequena parcela na troca de calor, é possível analisar que em um sistema de 62 tubos seria o suficiente para alcançar uma troca maior e alcançar uma temperatura próximo ao 60°C.

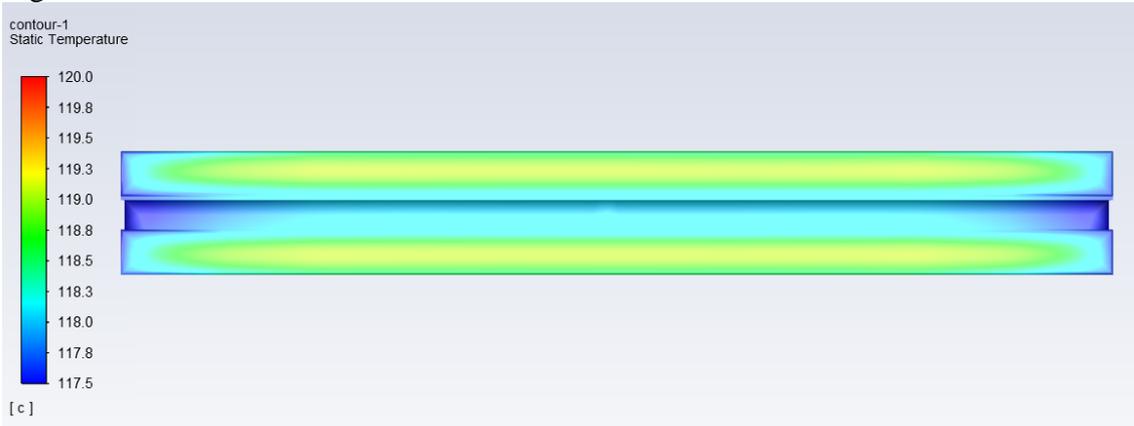
Figura 83 - Saída do tubo com o fluido base



Fonte: Autores.

Observa-se que o fluido base, o etilenoglicol/água, não troca calor de maneira uniforme em todo o comprimento do tubo, sendo a maior troca de calor concentrada na parte de contato entre o fluido e o tubo, a denominada “camada limite”. Com isso, não existe um delta muito grande entre a temperatura de entrada e saída.

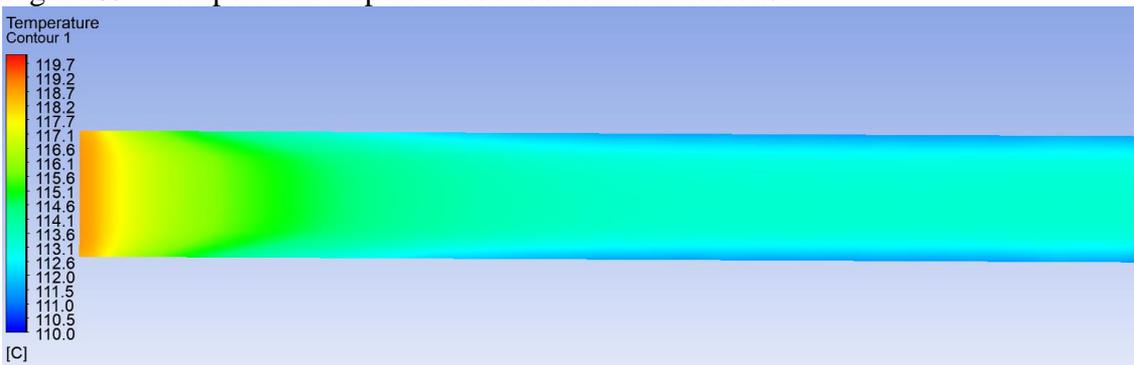
Figura 84 - Saída do tubo com o nanofluido



Fonte: Autores.

Para o nanofluido foi observada uma troca de calor mais uniforme, devido a sua alta condutividade térmica, reduzindo assim a temperatura em 1°C no centro, com relação ao fluido base ao longo de todo o comprimento do tubo.

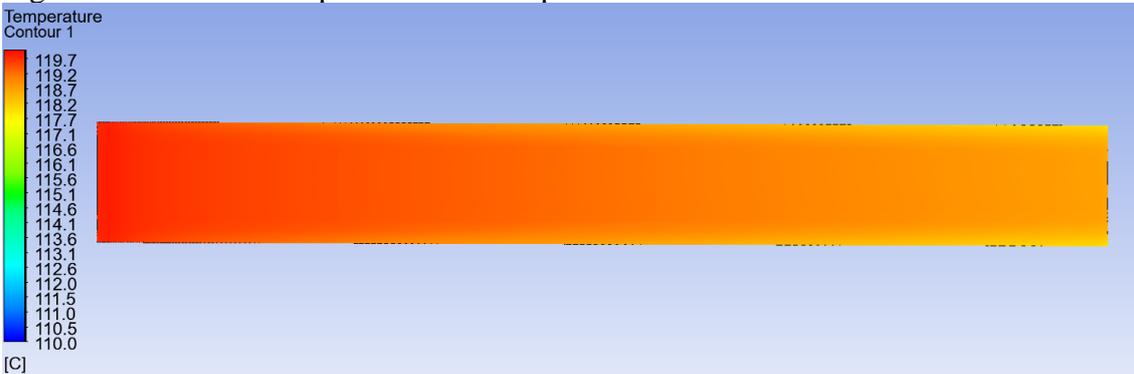
Figura 85 - Temperatura na parede do tubo com o fluido base



Fonte: Autores.

É possível perceber que o fluido base troca mais calor na entrada do tubo e tem uma queda repentina na quantidade de calor trocado conforme se aproxima do centro do tubo.

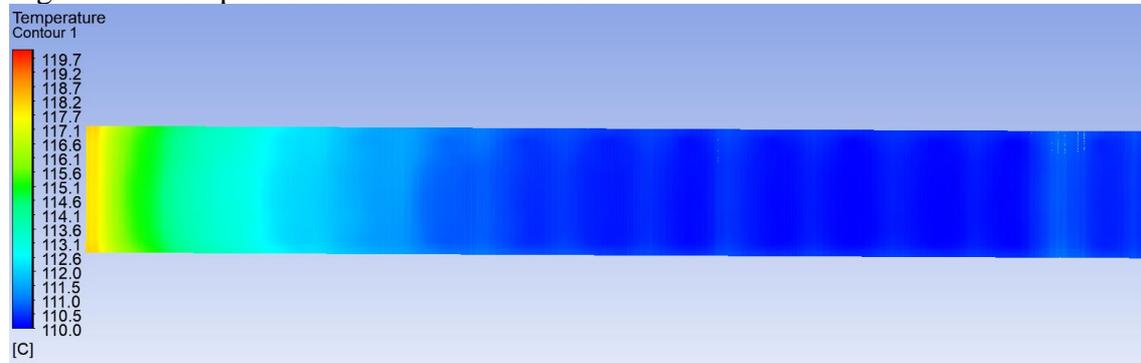
Figura 86 - Temperatura na parede do tubo com o nanofluido



Fonte: Autores.

Quando comparamos o fluido base com o nanofluido, também é perceptível uma redução na troca de calor conforme se aproxima do centro do tubo, porém a redução é bem menor quando comparado ao fluido base.

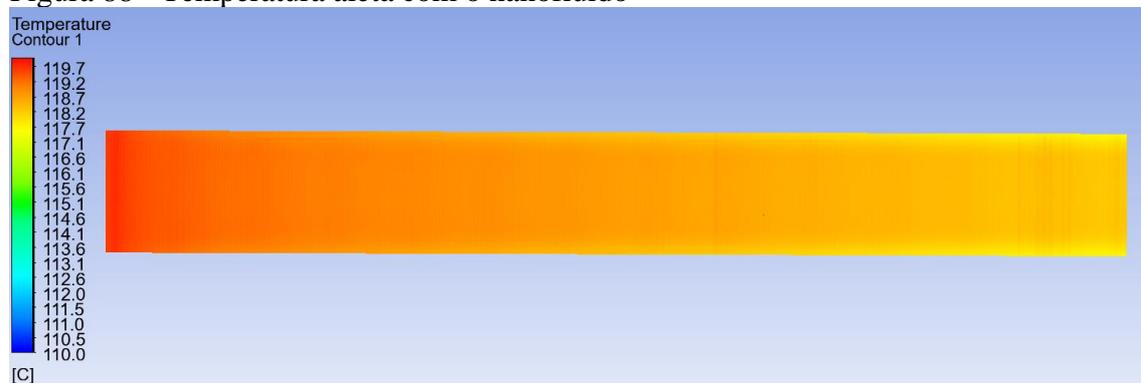
Figura 87 - Temperatura aleta com o fluido base



Fonte: Autores.

Na situação de troca de calor com o etilenoglicol/água, é perceptível uma troca de calor menos homogênea ao longo do comprimento do tubo. Isto possibilita a troca de calor com a redução de temperatura de 1°C.

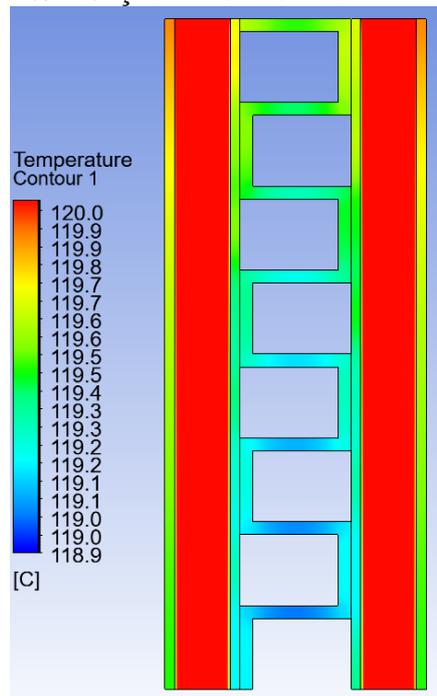
Figura 88 - Temperatura aleta com o nanofluido



Fonte: Autores.

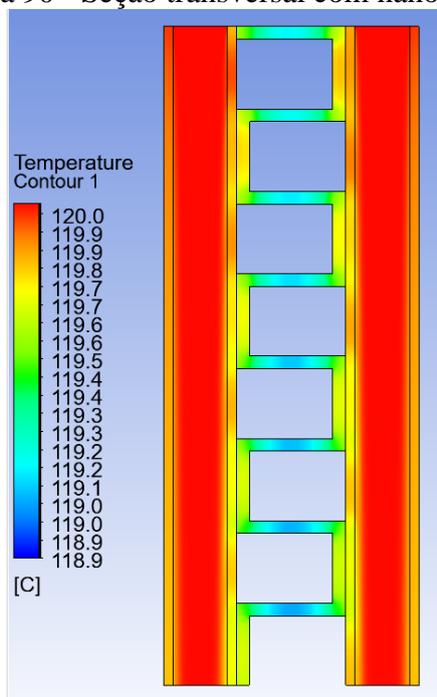
Para as aletas trocando calor com o nanofluido, pode-se perceber uma troca mais homogênea de calor, possibilitando reduzir a temperatura na ordem de 2°C.

Figura 89 - Seção transversal com fluido base



Fonte: Autores.

Figura 90 - Seção transversal com nanofluidos



Fonte: Autores.

Como a tubulação possui um comprimento muito extenso, seria inviável para a simulação utilizar o comprimento total do tubo e das aletas, devido às limitações de desempenho computacional e leitura de dados. Portanto, utilizando o modelo reduzido, considerando na Figura 89, com fluido convencional para realizar a troca de calor, percebe-se que a troca de calor não é uniforme quando comparada com a Figura 90 que

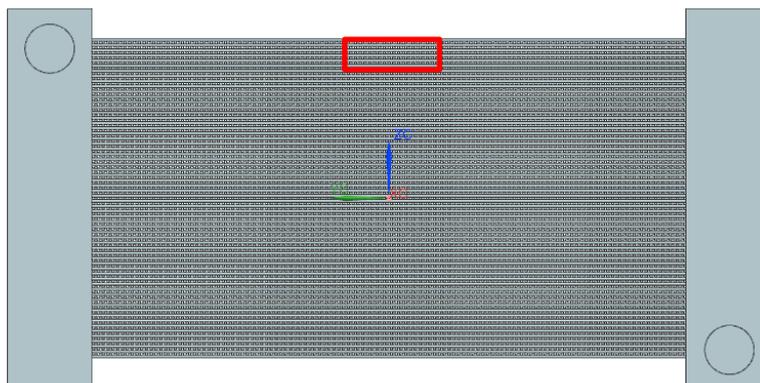
utiliza nanofluido, mostrando o quanto está sendo retirado de calor do sistema quando observado as paredes do tubo e a quantidade de calor encaminhada as aletas.

11 MODELAMENTO 3D

Com as dimensões estruturais dos radiadores definidas e demonstradas na Tabela 8, em conjunto com os valores calculados e mostrados na Tabela 10, foram modelados os radiadores em dois programas de modelagem 3D: o *Siemens NX* e o *Katia V5*. Com o auxílio dessas duas ferramentas foi possível construir o radiador dedicado, conforme a Figura abaixo, definido pelo grupo para melhor visualização do componente. Esse radiador dedicado é constituído por 3 componentes principais:

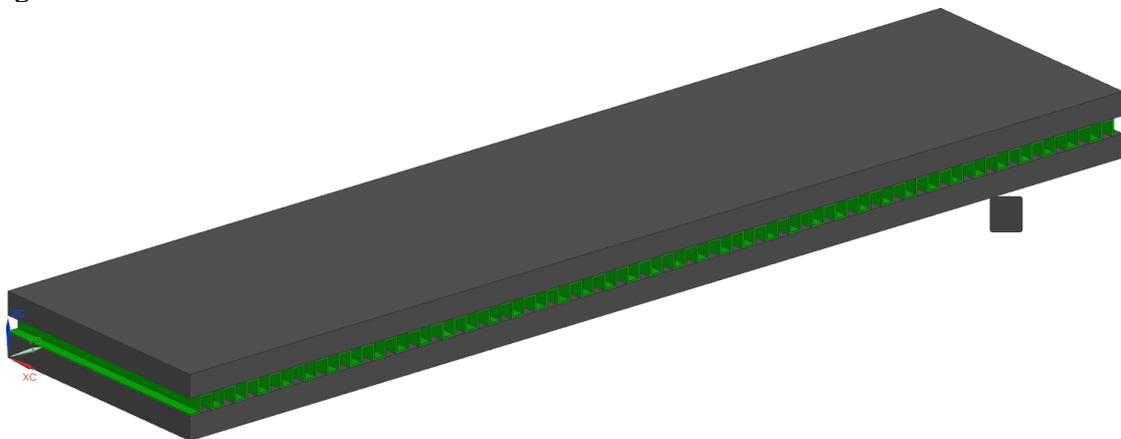
- a) Tubos para a passagem de fluido de arrefecimento;
- b) Aletas para a troca de calor;
- c) Tampas.

Figura 91 - Radiador modelado por NX



Fonte: Autores.

Figura 92 - Modelo reduzido do radiador dedicado



Fonte: Autores.

Foi feito um modelo reduzido com três elementos (uma fileira de aletas e dois tubos) para auxiliar nas simulações na ferramenta ANSYS, como mostra a Figura 92, e destacada em vermelho na Figura 91. Esse modelo reduzido está representando o radiador dedicado como um todo.

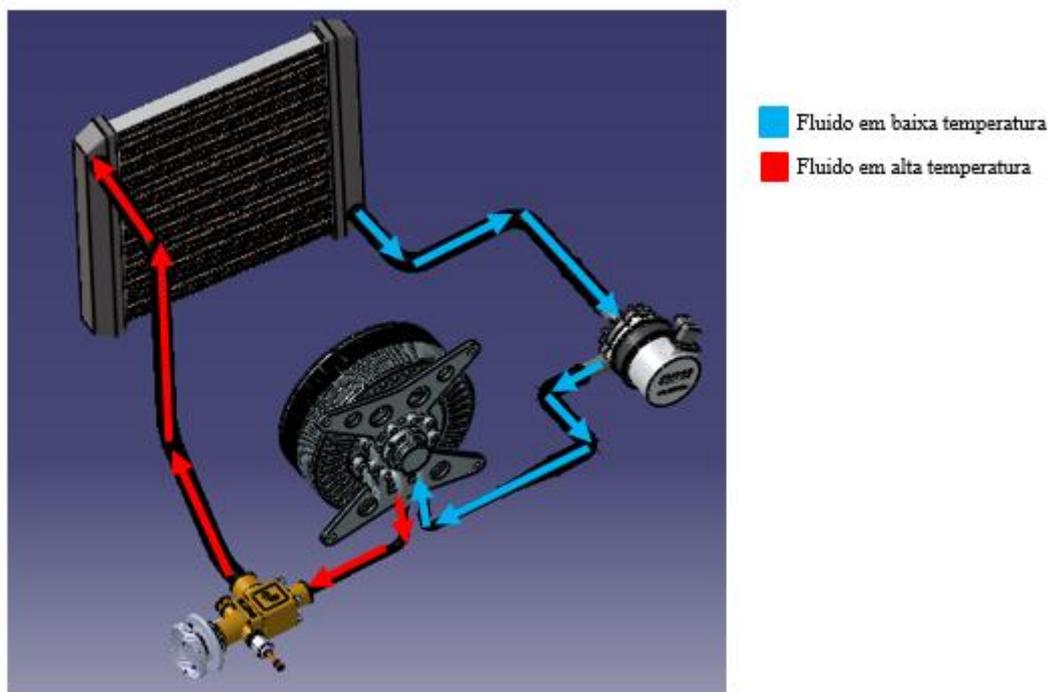
11.1 MONTAGEM ESQUEMÁTICA DO SISTEMA

As montagens dos sistemas de arrefecimento dedicados, a serem utilizados no veículo elétrico para o motor elétrico e o inversor, com os componentes devidamente estabelecidos e dimensionados para que fosse obtido a melhoria estipulada, serão representados mais a frente. Foram pesquisados arquivos em CAD do motor elétrico e inversor, porém nenhum arquivo foi encontrado. Com isso, foram utilizados documentos CAD do motor elétrico da *EMRAX* e do inversor *Rinehart*.

Pode-se ver em vermelho (líquido em alta temperatura) e azul (líquido em baixa temperatura) que o líquido de arrefecimento percorre o seguinte caminho para o motor elétrico:

- a) O líquido sai do radiador sendo bombeado pela bomba em direção à entrada do motor em baixas temperaturas;
- b) Ele então passa pelo motor elétrico resfriando-o. Isto ocorre por meio da troca de calor entre a carcaça do rotor e o líquido saindo do motor elétrico com uma temperatura mais elevada;
- c) O líquido então segue para a válvula termostática que, com o calor do líquido de arrefecimento, abre e permite a passagem para o radiador que fará a troca de calor com as aletas, reduzindo a temperatura. O processo então se repete de forma contínua de modo a manter a temperatura de trabalho na faixa ideal de trabalho.

Figura 93 - Representação esquemática do sistema de arrefecimento para o motor elétrico

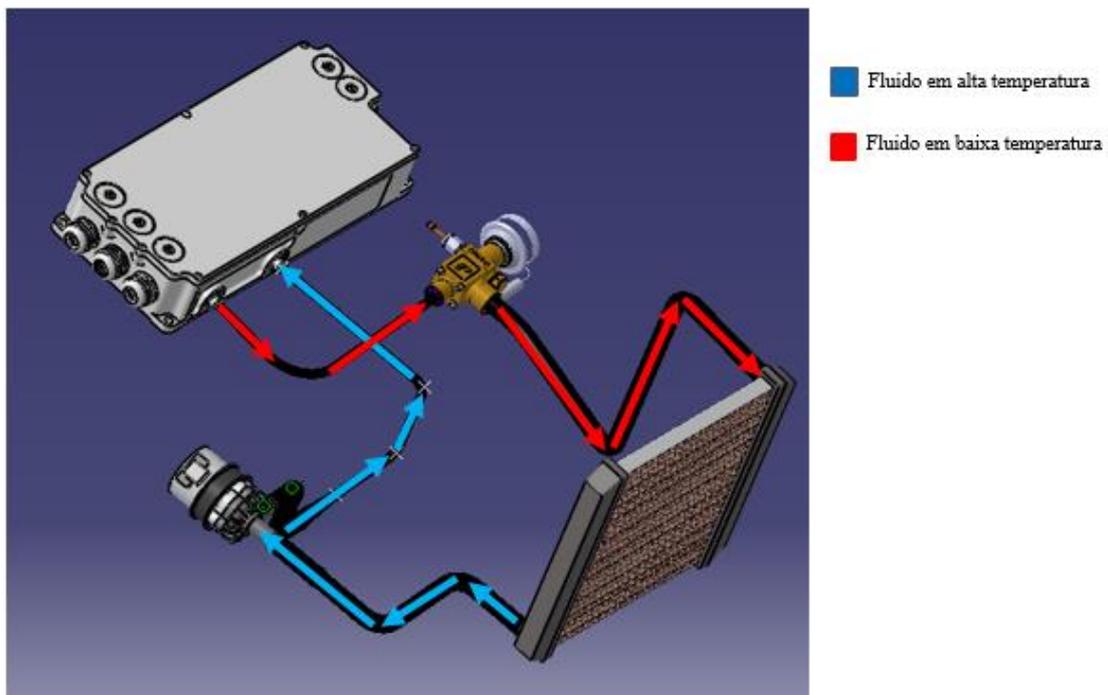


Fonte: Autores.

Para o inversor podemos ver em vermelho (líquido em alta temperatura) e azul (líquido em baixa temperatura) o líquido de arrefecimento percorre o seguinte caminho:

- a) O líquido sai do radiador sendo bombeado pela bomba em direção a entrada do inversor em baixas temperaturas;
- b) Ele então passa pelo inversor resfriando-o. Isto ocorre por meio da troca de calor entre os componentes do inversor, sendo assim o líquido sai do inversor com uma temperatura mais elevada;
- c) O líquido então segue para a válvula termostática que, com o calor do líquido de arrefecimento, abre e permite a passagem para o radiador que fará a troca de calor com as aletas reduzindo a temperatura. O processo então se repete de forma contínua de modo a manter a temperatura de trabalho na faixa ideal de trabalho.

Figura 94 - Representação esquemática do sistema de arrefecimento para o inversor



Fonte: Autores.

12 CUSTO DO PROJETO

Para o custo preliminar do projeto, foram consideradas quatro frentes: o desenvolvimento do projeto, feito pelos oito engenheiros do grupo, eventuais consultorias e parcerias, como o auxílio de especialistas e manufatura terceirizada, licença de softwares e prototipagem, com os valores estimados para cada dessas frentes explicitados a seguir:

- a) Engenharia: 8 engenheiros desenvolvendo o projeto, considerando o salário médio de engenheiros mecânicos de R\$8.204,89, de acordo com o eSocial de 2021, por aproximadamente 18 meses, custando R\$1.181.504,16;
- b) Estrutura para desenvolvimento, como as licenças de *software*: *Ansys Workbench* (\$30.000), *AVL Cruise* (\$10.000) e *Siemens NX* (\$7.500), levando em consideração o câmbio do dia 17 de abril de 2021, que um dólar equivale a R\$5,58, resultando em um investimento de R\$ 265.465,15;
- c) Protótipo: para essa montagem é necessário considerar tanto o custo dos materiais quanto o custo que está por trás dessa montagem, o que para protótipos costuma ser em torno de dez vezes o custo da mula. Assim, tem-se que: dois radiadores por R\$ 1.640,00, motor elétrico por R\$ 80.000,00, inversor por R\$ 13.000,00, duas bombas d'água por R\$ 200,00, tubulação custando R\$ 30,00, nanofluidos como líquido de arrefecimento por R\$ 623,29 (cálculo do custo será explicitado a seguir) e os R\$ 760,00 das duas válvulas de controle, bem como o carro base para mula, o Prius, de R\$ 196.390,00, soma-se R\$ 292.662,54. Multiplicando esse valor por dez (que é a média de custo de protótipos para as montadoras) o custo total de prototipagem é de R\$ 2.926.432,90.

O custo do nanofluido, de acordo com os estudos de Sylwia Weislik (2017), depende primariamente do custo das nanopartículas, C_{nano} , que se resume no unitário das nanopartículas, C_u , da massa dessas partículas, $m = \rho \cdot V$, e dos outros custos relacionados a preparação da solução, C_{outros} , que por hora, será considerado nulo; e do custo do fluido base, C_{base} .

$$C_T = C_{Nano} + C_{base}, C_{Nano} = C_u \cdot \rho \cdot V + C_{outros}$$

As nanopartículas de Al_2O_3 de 30 nm de diâmetro estão presentes na solução com fração volumétrica de 0,055, assim sendo, 209 gramas na solução, custando R\$ 1.874,36 o quilo, ou seja, cada grama custa R\$ 1,87. Considerando também que o arrefecimento do sistema de propulsão usa em média 3,8 L de fluido, que a mistura 50% água e 50% etilenoglicol tem massa específica $1015,57 \text{ kg/m}^3$, o que quer dizer que são usados 3,86 kg para arrefecer o sistema de propulsão, e cada quilograma custa R\$ 60, tem-se que:

$$C_{Nano} = 1,87 \cdot 209 = 391,74 \text{ reais}$$

$$C_T = 391,74 + 3,86 \cdot 60 = 623,29 \text{ reais}$$

Como custos adicionais, tivemos o valor de R\$ 300.000,00 para despesas com consultorias, parcerias e publicações pagas, por exemplo.

Resultando em custo de R\$ 4.673.523,26. Entretanto, esse é um cálculo superficial e considera que todos os recursos da empresa estariam alocados exclusivamente para o desenvolvimento desse projeto em particular, o que não é verdade na realidade da indústria. Assim, sabendo que o custo de software é diluído entre os projetos, os veículos para mula têm um custo muito menor, já que normalmente são retirados da linha de produção (ou seja, para uma montadora o impacto é apenas o do custo de produção), os testes de engenharia e validação, que estão embutidos no custo do protótipo, são usualmente feitos justamente com algum outro projeto (sem interferências), os engenheiros não se dedicam exclusivamente e, em termos de custo do material, o motor elétrico e o inversor, que são os componentes mais caros, não devem ser levados em conta, uma vez que já existem no veículo.

Dessa maneira, o custo total do projeto não passa de R\$ 200.000,00.

13 CONCLUSÃO

Partindo da premissa do sistema de arrefecimento dos carros de Fórmula E, em que há uma separação entre *powertrain* e bateria, o projeto do grupo propôs uma aplicação análoga nos carros de passeio, com o intuito de melhorar a autonomia. Assim, o sistema de arrefecimento foi dividido entre motor elétrico e inversor, além da troca do fluido de arrefecimento comum por um nanofluido.

Entretanto, os resultados encontrados não foram tão expressivos como os propostos no target, o que pode ser explicado por alguns motivos: as únicas mudanças feitas foram nos componentes do sistema de arrefecimento e para que melhores números sejam obtidos talvez seja necessário combinar o projeto com outras mudanças, como na carroceria (para melhor aerodinâmica, por exemplo), reprogramação de ECU, alívios de massa etc. Além disso, é possível ver que os maiores ganhos estão em altas rotações, características dos veículos de competição, mas não tão comuns para veículos de passeio.

Das simulações, podemos ver que o nanofluido permite que as trocas térmicas dentro do radiador ocorrem de maneira mais uniforme, devido à alta condutividade térmica, permitindo uma maior diminuição de temperatura.

Assim, é possível concluir que, por mais que os resultados não estejam próximos do target sugerido, a melhoria de 0,4% existe e é eficaz, mesmo sendo expressiva em condições mais extremas de uso (altas rotações), e, quando combinada com outros fatores (como o nanofluido e potencializar com outras mudanças, como as mencionadas anteriormente, diminuição de peso e melhorias aerodinâmicas), permite que os componentes trabalhem de maneira mais eficiente.

REFERÊNCIAS

- ABB FORMULA E. **GEN1 vs. GEN2: The comparison**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.fiaformulae.com/en/discover/cars-and-technology?season=2022016>. Acesso em 07 de outubro de 2020.
- AICHIKIKAI. **About powertrains for electric vehicles: Mechanism of powertrain for electric vehicles**. [S.l.], 2020. Disponível em: <http://www.aichikikai.co.jp/en/powertrain/>. Acesso em 21 de setembro de 2020.
- AMAZON. **Genuine Toyota Parts (G9020-47031) Water Pump Assembly**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.amazon.com/Genuine-Toyota-G9020-47031-Water-Assembly/dp/B00KTITKN6>. Acesso em 16 de maio de 2021.
- ANTUNES, Paulo D. R. **Veículos elétricos, funcionamento e seus benefícios**. 2018. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário UNIFACVEST, Lages, 2018.
- AUDI e-tron cooling concept e-motor. [S.l.]: AutoMoto TV, 10 de outubro de 2019. Online. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=9fS5OuvkTRE>. Acesso em 26 de setembro de 2020.
- AYERS, C. W. *et. al.* **Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System Interim Report**. [S.l.]: U.S. Department of Energy: Oak Ridge National Laboratory, 2004. Disponível em: <https://technicalreports.ornl.gov/cppr/y2001/rpt/121813.pdf>. Acesso em 15 de abril de 2021.
- BARAN, Renato; LEGEY, Luiz Fernando L.. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. In: **BNDES Setorial**, v. 33, pp. 207-224, 2010.
- BERTONCELLO, Ricardo *et. al.* Dimensionamento de componentes e controle automático de velocidade e consumo para veículo elétrico. In: **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC'2017**, Belém, 8 a 11 de agosto de 2017. **Paper**. Disponível em: https://www.confex.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2017/eletrica/9_ddcecadvecpve.pdf. Acesso em 15 de novembro de 2020.
- BHAVASE, Bharat A., *et. al.* Intensified heat transfer rate with the use of nanofluids. In: HUSSAIN, Chaudhery Mustansar. **Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications**. 1 ed. [S.l.]: Elsevier, 2018. pp. 739-750. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nanofluids>. Acesso em 15 de maio de 2021.
- BIRCH, Tom. **Automotive Heating and Air Conditioning**. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2000.
- BMW using flax fiber cooling shaft in iFE.20 Formula E racer. **Green Car Congress**, [S.l.], 29 de dezembro de 2019. Disponível em:

<https://www.greencarcongress.com/2019/12/20191229-bmw.html#:~:text=The%20cooling%20system%20for%20Formula,motor%2C%20power%20electronics%20and%20battery>. Acesso em 2 de outubro de 2020.

BOSCH. Water-circulation pumps with D.C. motors: PCA 12V. [S.l.], [20...]. Disponível em: <http://www.siliconeintakes.com/images/product/BOSCH-0392022002.pdf>. Acesso em 19 de maio de 2021.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. rev. [S.l.], Pearson Prentice Hall, 2008.

BUFALO, Luis Alfredo; GONELLI, Gabriel M.; BAUMGARTNER, Luis F. Gerenciamento térmico da bateria em veículos elétricos: o sistema líquido combinado. In: Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, XXV. **Anais**, v. 04, n. 01, Set. 2017. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/gerenciamento-trmico-da-bateria-em-veculos-eltricos-o-sistema-lquido-combinado-26560>. Acesso em 15 de maio de 2021.

BURRESS, T. A. *et. al.* **Evaluation of the 2007 Toyota Camry hybrid synergy drive system.** [S.l.]: U.S. Department of Energy: Oak Ridge National Laboratory, 2008. Disponível em: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc895905/m2/1/high_res_d/928684.pdf. Acesso em 15 de maio de 2021.

BURRESS, T. A. *et. al.* **Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system.** [S.l.]: U.S. Department of Energy: Oak Ridge National Laboratory, 2011. Disponível em: <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/pub26762.pdf>. Acesso em 15 de maio de 2021.

BUSCH, Henning Lohse. **Thermal Overload Capabilities of an Electric Motor and Inverter Unit Through Modeling Validated by Testing.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.

CANAL AGRÍCOLA. **Válvula Elétrica PGV 101 24V de 1” com Controlador de Fluxo para Irrigação Hunter.** [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.canalagricola.com.br/valvula-eletrica-pgv-101-1-controlador-fluxo-irrigacao-hunter>. Acesso em 19 de maio de 2021.

CARDOSO, André Scaranto. **Análise e simulação do funcionamento de trocadores de calor sob condição de entupimento.** Artigo online. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2011/Artigos/Art_TCC_006_2011.pdf. Acesso em 16 de maio de 2021.

CARLSON, R.; WISHART J.; STUTENBERG, K. On-Road and Dynamometer Evaluation of Vehicle Auxiliary Loads. **SAE Int. J. Fuels Lubr.**, v. 9, n. 1, 2016. Disponível em: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2016-01-0901/>. Acesso em 12 de dezembro de 2020.

CARUSO, Catherine. Why range anxiety for electric cars is overblown. **MIT Technology Review**, [S.l.], 15 de Agosto de 2016. Disponível em: <https://www.technologyreview.com/2016/08/15/158319/why-range-anxiety-for-electric-cars-is-overblown/>. Acesso em 10 de setembro de 2020.

ÇENGEL, Yunus A; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4.ed. [S.l.]: McGraw Hill Education, 2012.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Micheal A. **Termodinâmica**. 7. ed. [S.l.]: McGraw Hill Education, 2013.

CHEN, Dafen *et. al.* Comparison of Different Cooling Methods for Lithium Ion Battery Cells. National Active Distribution Network Technology Reserach Center. **Applied Thermal Engineering**, v. 94, pp. 846-854, 2016.

CHRYSLER LLC; FORD MOTOR COMPANY; GENERAL MOTORS CORPORATION. **Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)**: Reference Manual. 4. Ed. [S.l.], [s.n.], 2008.

COLLIJN, Mikaela; JOHANSSON, Emma. **Design for Assembly and Disassembly of Battery Packs**. Master's Thesis (Product Development) – Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2019.

CONNOR, Nick. O que é diâmetro hidráulico – definição. **Thermal Engineering**, [S.l.], 14 de novembro de 2019. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-diametro-hidraulico-definicao/>. Acesso em 18 de maio de 2021.

CORTEZ, Gilberto Garcia. **Determinação do regime de escoamento**: Experiência de Reynolds. [20...]. Slides. Online. Disponível em: <http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840841/LOQ4060/AULA%20PRATICA%2001.pdf>. Acesso em 18 de maio de 2021.

DENTON, Tom. **Veículos Elétricos e Híbridos**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2018.

DIAS, Anderson Luiz. Sistema de Arrefecimento dos Motores de Combustão Interna. **Carros In Foco**, [S.l.], 07 de julho de 2014. Disponível em: <https://carrosinfoco.com.br/2014/07/sistema-de-arrefecimento-dos-motores-de-combustao-interna-2/>. Acesso em 02 de outubro de 2020.

EBAY. **Radiator for 2004-09 Toyota Prius 1.5l 1 Row**. [S.l.], 2021. Disponível em: https://www.ebay.com/itm/Radiator-For-2004-09-Toyota-Prius-1-5L-1-Row-/351772561807?_ul=BR. Acesso em 16 de maio de 2021.

EDMONDSON, James; COLLINS, Richard. Thermal management for electric vehicles 2020-2030. **Idtechex**, [S.l.], 2020. Research Reports. Disponível em: <https://www.idtechex.com/en/research-report/thermal-management-for-electric-vehicles-2020-2030/715>. Acesso em 29 de setembro de 2020.

ENERGY EDUCATION. **Electric Vehicle**. [S.l.], 2020. Disponível em: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Electric_vehicle#/find/nearest?fuel=ELEC. Acesso em 27 de setembro de 2020.

ENGEVEL. **A válvula termostática faz parte do sistema de arrefecimento do motor, que é um dos mais importantes de um veículo**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://engevel.com.br/para-que-serve-valvula-termostatica/>. Acesso em 16 de junho de 2021.

eROADARLANDA. **Why electrified roads?**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://eroadarlanda.com/need-electrified-roads/>. Acesso em 10 de setembro de 2020.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos. PSI 2618 - Circuitos Eletrônicos Automotivos. **Caderno Técnico Colaborativo: Toyota Prius - Tecnologia Híbrida**. São Paulo, 2017. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5679986/mod_resource/content/1/Toyota%20Prius%20-%20Caderno%20T%C3%A9cnico%20Colaborativo%20POLI%20USP.pdf. Acesso em 16 de maio de 2021.

EZEROGLU, Caner. Tesla Model 3 & Model S Thermal Management Systems. **Blog – Caner Ezeroglu**, [S.l.], 07 de fevereiro de 2019. Disponível em: <https://canerezeroglu.blogspot.com/2019/02/tesla-model-3-model-s-thermal-systems.html>. Acesso em 15 de julho de 2021.

FARADAY FUTURE. **Home**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.ff.com/>. Acesso em 14 de setembro de 2020.

FGV ENERGIA; ACCENTURE STRATEGY. **Electric Vehicles**. Rio de Janeiro: FGV Energia, 2017.

FI GROUP ROTA 2030. **Benefícios do Rota 2030**. Disponível em: <https://www.rota2030.com.br/beneficios-fiscais-rota-2030/>. Acesso em 06 de outubro de 2020.

FIRESTONE. **2004 Toyota Prius Tires**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://vehicle.firestonecompleteautocare.com/toyota/prius/2004/tires/>. Acesso em 17 de maio de 2021.

FITZGIBBON, Matt. 5 Reasons Why You Should Buy an Electric Vehicle in 2020. **Tri-State Media**, [S.l.], 16 de janeiro de 2020. Disponível em: <https://tristate.coop/5-reasons-why-you-should-buy-electric-vehicle-2020>. Acesso em 15 de junho de 2021.

GANJI, Davood Domairry; SABZEHMEIDANI, Yaser; SEDIGHIAMIRI, Amin. Heat Transfer in Nanofluids. In: GANJI, Davood Domairry; SABZEHMEIDANI, Yaser; SEDIGHIAMIRI, Amin. **Nonlinear Systems in Heat Transfer: Mathematical Modeling and Analytical Methods**. [S.l.]: Elsevier Science 2018. pp. 153-223. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128120248000047?via%3Dihub>. Acesso em 15 de abril de 2021.

GERRARD, Brayden. 2018 Was A Huge Year For Electric Vehicles (In Charts). **Medium**, [S.l.], 31 de janeiro de 2019. Disponível em: <https://braydeng.medium.com/2018-was-a-huge-year-for-electric-vehicles-in-charts-b6aad055bdff>. Acesso em 15 de junho de 2021.

GM e LG Chem investem US\$ 2,3 bi em fábrica de baterias. **Revista Forbes**, [S.l.], 05 de dezembro de 2019. Disponível em: <https://forbes.com.br/last/2019/12/gm-e-lg-chem-investem-us-23-bi-em-fabrica-de-baterias/>. Acesso em 05 de outubro de 2020.

GRUPO WEG. **Soluções em propulsão e tração elétrica**. Jaguará do Sul/SC, 2013. Disponível em: <http://www.motoreletrico.net/upload/WEG-solucoes-em-propulsao-tracao-eletrica-50042550-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em 29 de setembro de 2020.

HELLA TECH WORLD. **Thermal Management in Electric and Hybrid Vehicles**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.hella.com/techworld/uk/Technical/Car-air-conditioning/Thermal-management-in-electric-and-hybrid-vehicles-1725/>. Acesso em 29 de setembro de 2020.

HOLKAR, Chandrakant R. *et. al.* Scale-Up Technologies for Advanced Nanomaterials for Green Energy: Feasibilities and Challenges. In: BHANVASE. Bharat A. *et. al.* (Ed.) **Nanomaterials for Green Energy: Micro and Nano Technologies**. [S.l.]: Elsevier, 2018. pp. 433-455. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nanofluids>. Acesso em 15 de maio de 2021.

IENO, Gilberto; NEGRÃO, Luiz. **Termodinâmica**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2004.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2020**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>. Acesso em 05 de outubro de 2020.

IZOLA, Dawson. **Práticas de laboratório: Mecânica dos fluidos**. 1 ed. Araras, SP: Fundação Hermínio Ometto-FHO/CEMAD, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-113-Diagrama-de-Moody-Rouse_fig1_343858524 . Acesso em 07 de abril de 2021.

JARDINI, André Luiz *et. al.* Integração de prototipagem rápida e engenharia reversa no desenvolvimento rápido do produto. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 6º, 11 a 16 de abril de 2011, Caxias do Sul/RS, **Paper**. Disponível em: <http://alvarestech.com/temp/cobef2011/grima.ufsc.br/cobef2011/media/trabalhos/COF11-0291.pdf>. Acesso em 18 de outubro de 2020.

KANE, Mark. Deep dive: Chevrolet Bolt battery pack, motor and more. **InsideEvs - News**, [S.l.], 10 de abril de 2016. Disponível em: <https://insideevs.com/news/329695/deep-dive-chevrolet-bolt-battery-pack-motor-and-more/>. Acesso em 29 de setembro de 2020.

KANE, Mark. XING Mobility explains IMMERSIO battery pack cooling system. **InsideEvs - News**, [S.l.], 05 de maio de 2020. Disponível em: <https://insideevs.com/news/419969/xing-immersio-battery-pack-cooling-system/>. Acesso em 28 de setembro de 2020.

KARIMI, G.; LI, X. Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. **International Journal of Energy Research**, 2012. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.1956>. Acesso em 28 de setembro de 2020.

KELLY, K. J. *et al.* Assessment of Thermal Control Technologies for Cooling Electric Vehicle Power Electronics, 2008. In: **National Renewable Energy Laboratory**, January de 2008. Conference Paper. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42267.pdf>. Acesso em 13 de novembro de 2020.

KIM, Sung Chul. Thermal Performance of Motor and Inverter in an Integrated Starter Generator System for a Hybrid Electric Vehicle. **Energies**, v. 6, n. 11, pp. 6102-6119, 2013.

KLEINSTREUER, Clement; FENG, Yu. Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review. **Nanoscale Res Lett**, v. 6, n. 229, 2011.

KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S. **Princípios de Transferência de Calor**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

LAMARRE, Jeff. FSAE Electric Vehicle Cooling System Design. **Honors Research Projects**, n. 33, [S.l.], 2015. Disponível em: https://ideaexchange.uakron.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1143&context=honors_research_projects. Acesso em 26 de maio de 2021.

LINDEN, David; REDDY, Thomas B. **Handbook of Batteries**. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Handbooks, 2001.

LIU, J. *et al.* Design of the Chevrolet Bolt EV Propulsion System. **SAE Int. J. Alt. Power**, v. 5, n. 1, pp. 79-86, 2016. Disponível em: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2016-01-1153/>. Acesso em 24 de setembro de 2020.

LOBO, Marcos Thadeu. Líquido de arrefecimento tem função importante no motor. **Portal Lubes**, [S.l.], 14 de julho de 2019. Disponível em: <https://portallubes.com.br/2019/07/liquido-de-arrefecimento/>. Acesso em 16 de maio de 2021.

LOHSE-BUSCH, H., *et al.* Ambient Temperature (20°F, 72°F and 95°F) Impact on Fuel and Energy Consumption for Several Conventional Vehicles, Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicles and Battery Electric Vehicle. In: SAE 2013 World Congress & Exhibition SAE, 2013. **Paper**. Disponível em: <https://saemobilus.sae.org/content/2013-01-1462/>. Acesso em 15 de novembro de 2020.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1985.

LUCID MOTORS. **Home**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.lucidmotors.com/>. Acesso em 14 de setembro de 2020.

MARSHALL, Garrett J. *et. al.* Thermal management of vehicle cabins, external surfaces and onboard electronics: An overview. **Elsevier Engineering**, v. 5, n. 5, pp. 954-969, 2019.

MAUGHAN, Ryan. What is the best electric vehicle battery cooling system?. **Avid Technology**, [S.l.], 2020. Disponível em: <https://avidtp.com/what-is-the-best-cooling-system-for-electric-vehicle-battery-packs/>. Acesso em 29 de setembro de 2020.

McKERRACHER, Colin *et. al.* **Electric Vehicle Outlook**. [S.l.], Bloomberg, 2020. Disponível em: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>. Acesso em 05 de outubro de 2020.

METTZER. **Home**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.mettzer.com/>. Acesso em 31 de março de 2021.

MONTEIRO, Marcelo Silva. 2019. Aplicação de nanofluidos em sistemas de refrigeração. Congresso Brasileiro de Refrigeração, Ar-Condicionado, Ventilação, Aquecimento e Tratamento do Ar, XVI CONBRAVA, São Paulo Expo, 10 a 13 de Setembro de 2019, São Paulo. **Paper**. Disponível em: http://schenautomacao.com.br/abrava/anais/files/trabalhocompleto_20.pdf. Acesso em 15 de maio de 2021.

MTE-THOMSON. **Catálogo**. [S.l.], 2014. Disponível em: https://pt.slideshare.net/kesleyjaru/catalogo-mte?from_action=save. Acesso em 16 de maio de 2021.

NIKOLA MOTOR COMPANY. **Home**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://nikolamotor.com/>. Acesso em 14 de setembro de 2020.

NIO. **Home**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.nio.com/>. Acesso em 14 de setembro de 2020.

NOCE, Toshizaemom. **Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento**. 2009. 127f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

PANNONE, G. *et. al.* Decomposing Fuel Economy and Greenhouse Gas Regulatory Standards in the Energy Conversion Efficiency and Tractive Energy Domain. **SAE Int. J. Fuels Lubr**. v. 10, n. 1, pp. 202-216, 2017. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1349614>. Acesso em 10 de maio de 2021.

PHAM, Ariana. UK Consortium in 8M pounds project to design EV powertrain for global Market. **Green Car Congress**, [S.l.], 19 de junho de 2019. Disponível em:

<https://www.greencarcongress.com/2019/06/20190619-uk.html>. Acesso em 29 de setembro de 2020.

PIROPO, B. Esfriando a bateria. **Tech Tudo**, [S.l.], 25 de maio de 2013. Disponível em: <https://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2013/05/esfriando-a-bateria.html>. Acesso em 27 de setembro de 2020.

PORCHERA, Gustavo S. O. *et al.* Vantagens e barreiras à utilização de veículos elétricos. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, XIII, 31 de outubro a 01 de novembro de 2016. **Resumo online**. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos16/28224302.pdf>. Acesso em 10 de novembro de 2020.

PORQUE dimensionar seu inversor é uma boa ideia. **Portal Solar – Blog Solar**, [S.l.], 03 de fevereiro de 2017. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/curiosidades-sobre-energia-solar/porque-dimensionar-o-seu-inversor-e-uma-bo-ideia.html>. Acesso em 27 de setembro de 2020.

POWERTRAIN options. **Daryanenergyblog**, [S.l.], 2020. Disponível em: https://daryanenergyblog.wordpress.com/peak-oil-primer/part-4_energy_efficiency/4-2-1-powertrain-options/. Acesso em 24 de setembro de 2020.

REIMERS, John *et al.* Automotive Traction Inverters: Current Status and Future Trends. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 68, n. 4, pp. 3337-3350, 2019.

RIBEIRO, Rodrigo. Por que os carros elétricos não têm grade do radiador?. **Quadro Rodas** [S.l.], 17 de dezembro de 2019. Auto-serviço. Disponível em: <https://quatorodas.abril.com.br/auto-servico/correio-tecnico-por-que-os-carros-eletricos-nao-tem-grade-do-radiador/>. Acesso em 26 de setembro de 2020.

RICHTER, Felix. Can falling battery prices power EV breakthrough?. **Statista**, [S.l.], 23 de setembro de 2020. Disponível em: <https://www.statista.com/chart/7713/electric-car-battery-prices>. Acesso em 20 de novembro de 2020.

RIVIAN. **Home**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://rivian.com/>. Acesso em 14 de setembro de 2020.

RHODES, K., *et al.* Estimation of the Effects of Auxiliary Electrical Loads on Hybrid Electric Vehicle Fuel Economy. **SAE Technical Paper**, 2017. Disponível em: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2017-01-1155/>. Acesso em 10 de junho de 2021.

RUBBERFAST. **Mangueira Ar Água Alta Pressão Em Borracha**. [S.l.], 2021. Disponível em: https://www.rubberfast.com.br/produto/2_mangueiras/mangueira-ar-gua-alta-pressao-em-borracha.html. Acesso em 16 de maio de 2021.

RUGH, John P.; PESARAN, Ahmad; SMITH, Kandler. **Electric Vehicle Battery Thermal Issues and Thermal Management Techniques**. [S.l.]: SAE Alternative Refrigerant and System Efficiency, 2011.

RT CAR IMPORT. **Bomba Água Elétrica Motor BMW 320 328 2.0 Turbo 2011 – 2017**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.rtcimport.com.br/bomba-dagua-eletrica-motor-bmw-320-328-p14171>. Acesso em 16 de maio de 2021.

SCARBOROUGH, Craig. Playing it cool – the dynamics of modern F1 car cooling systems explained. **Motorsport Technology**, [S.l.], 03 de julho de 2019. Formula 1. Disponível em: <https://motorsport.tech/formula-1/car-cooling-systems-explained>. Acesso em 2 de outubro de 2020.

SANTOS, Sérgio Lopes dos. **Bombas e Instalações Hidráulicas**. São Paulo: LCTE Editora, 2007.

SILVA, Douglas da. O que é Golden Circle: entendendo o conceito de Simon Sinek. **Zendesk – Biblioteca**, [S.l.], 21 de março de 2021. Artigo. Disponível em: <https://www.zendesk.com.br/blog/o-que-e-golden-circle/>. Acesso em 15 de julho de 2021.

SISTEMA de arrefecimento: **Técnico Especialista Responde**, [S.l.], 15 de março de 2020. Ciaauto-online. Disponível em: <https://ciaauto.wordpress.com/2020/03/15/sistema-de-arrefecimento/>. Acesso em 16 de maio de 2021.

SHEIKHOESLAMI, Mohsen. Nanofluid Heat Transfer Enhancement in Presence of Melting Surface Using CVFEM. In: SHEIKHOESLAMI, Mohsen. **Application of Control Volume Based Finite Element Method (CVFEM) for Nanofluid Fluid and Heat Transfer**. [S.l.]: Elvieser, 2019. pp.675-706. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128141526000199?via%3Dihub>. Acesso em 14 de setembro de 2020.

STAUNTON, R. H. *et. al.* **Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System**. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory: UT-Battelle, LLC: U.S. Department of Energy, 2006. Disponível em: https://www.engr.uvic.ca/~mech459/Pub_References/890029.pdf. Acesso em: 26 de junho de 2021.

TEYSSANDIER, F; PRELÊ, D. Commercially Available Capacitors at Cryogenic Temperatures. Ninth International Workshop on Low Temperature Electronics - WOLTE9, Jun. 2010, Guarujá, Brazil, **Paper**. Disponível em: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00623399/document>. Acesso em 23 de maio de 2021.

THOMAS, J. Drive Cycle Powertrain Efficiencies and Trends Derived from EPA Vehicle Dynamometer Results. **SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.** v. 7, n. 4, pp. 1374-1384, 2014. Disponível em: <https://saemobilus.sae.org/content/2014-01-2562/>. Acesso em 21 de outubro de 2020.

TOYOTA e Panasonic formam joint venture para desenvolver baterias elétricas. **Revista Forbes**, [S.l.], 03 de fevereiro de 2020. Disponível em: <https://forbes.com.br/last/2020/02/toyota-e-panasonic-formam-joint-venture-para-desenvolver-baterias-eletricas/>. Acesso em 05 de outubro de 2020.

TRAN, Dai-Duong *et. al.* Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrain: topologies and integrated energy management strategies. **Elsevier: Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, 2020.

UNITED STATES. Department of Energy. **Where the energy goes: electric cars.** [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv-ev.shtml>. Acesso em 29 de setembro de 2020 (a).

UNITED STATES. Department of Energy. **How Do All-Electric Cars Work?.** [S.l.], 2020. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>. Acesso em 27 de setembro de 2020 (b).

VANDERWERP, Dave. EV Range: everything you need to know. **Car and Driver**, [S.l.], 22 de maio de 2020. Disponível em: <https://www.caranddriver.com/shopping-advice/a32603216/ev-range-explained/>. Acesso em 14 de setembro de 2020.

VENDITTI, Mário Sérgio. A história do carro elétrico. **Mobilidade – Estadão**, [S.l.], 15 de dezembro de 2020. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/inovacao/a-historia-do-carro-eletrico/>. Acesso em 25 maio de 2021.

VINOT, Emmanuel *et. al.*. Model Simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota Prius. **Int. J. Vehicle Systems Modelling and Testing**, v. 3, n. 3, 2008. Disponível em: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02005586>. Acesso em 30 de maio de 2021.

VOLVO PEÇAS. **Radiador para Caminhão Volvo – 21375354.** [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.volvopecas.com.br/radiador/p>. Acesso em 16 de maio de 2021.

VOVYO PUMP. **12v Electric Water Pump Motorcycle VP50N.** [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.vovyopump.com/product/12v-electric-water-pump-motorcycle/>. Acesso em 16 de maio de 2021.

WALMART. **Prestone All Vehicles - 10yr/300k mi- Antifreeze+Coolant (1 Gal - Concentrate).** [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.walmart.com/ip/Prestone-All-Vehicles-10yr-300k-mi-Antifreeze-Coolant-1-Gal-Concentrate/16879960>. Acesso em 16 de maio de 2021.

WANG, Xiang-Qi; MUJUMDAR, Arun. S. **A review on nanofluids - part I:** theoretical and numerical investigations. [S.l.]: National University of Singapore, Department of Mechanical Engineering, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjce/a/ywVr46Mbg8jCfhyftjW5Hhz/?lang=en>. Acesso em 15 de maio de 2021 (a).

WANG, Xiang-Qi; MUJUMDAR, Arun. S. **A review on nanofluids - part II:** experiments and applications. [S.l.]: National University of Singapore, Department of Mechanical Engineering, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjce/a/RNRxwhvvxMMrNCSDG885kSx/?lang=en>. Acesso em 15 de maio de 2021 (b).

WCISLIK, Sylwia. A simple economic and heat transfer analysis of the nanoparticles use. **Chem. Pap.**, v. 71, pp. 2395–2401, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11696-017-0234-4>. Acesso em 15 de maio de 2021.

WHICH challenges for EV batteries thermal performance. **Elkem – Blog**, [S.l.], 2020. Disponível em: <https://automotive.silicones.elkem.com/thermal-management-electric-vehicles/challenges-hev-batteries-thermal-performance>. Acesso em 29 de setembro de 2020.

WIRIYASART, S. *et. al.* Thermal management system with nanofluids for electric vehicle battery cooling modules. **Elsevier: Case Studies in Thermal Engineering**, v. 18, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338442846_Thermal_management_system_with_nanofluids_for_electric_vehicle_battery_cooling_modules. Acesso em 12 de abril de 2021.

WHY can't anyone take down Tesla?. [S.l.]: Donut Media, 2020. Online. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=NF1wqf5pBdM>. Acesso em 29 de setembro de 2020.

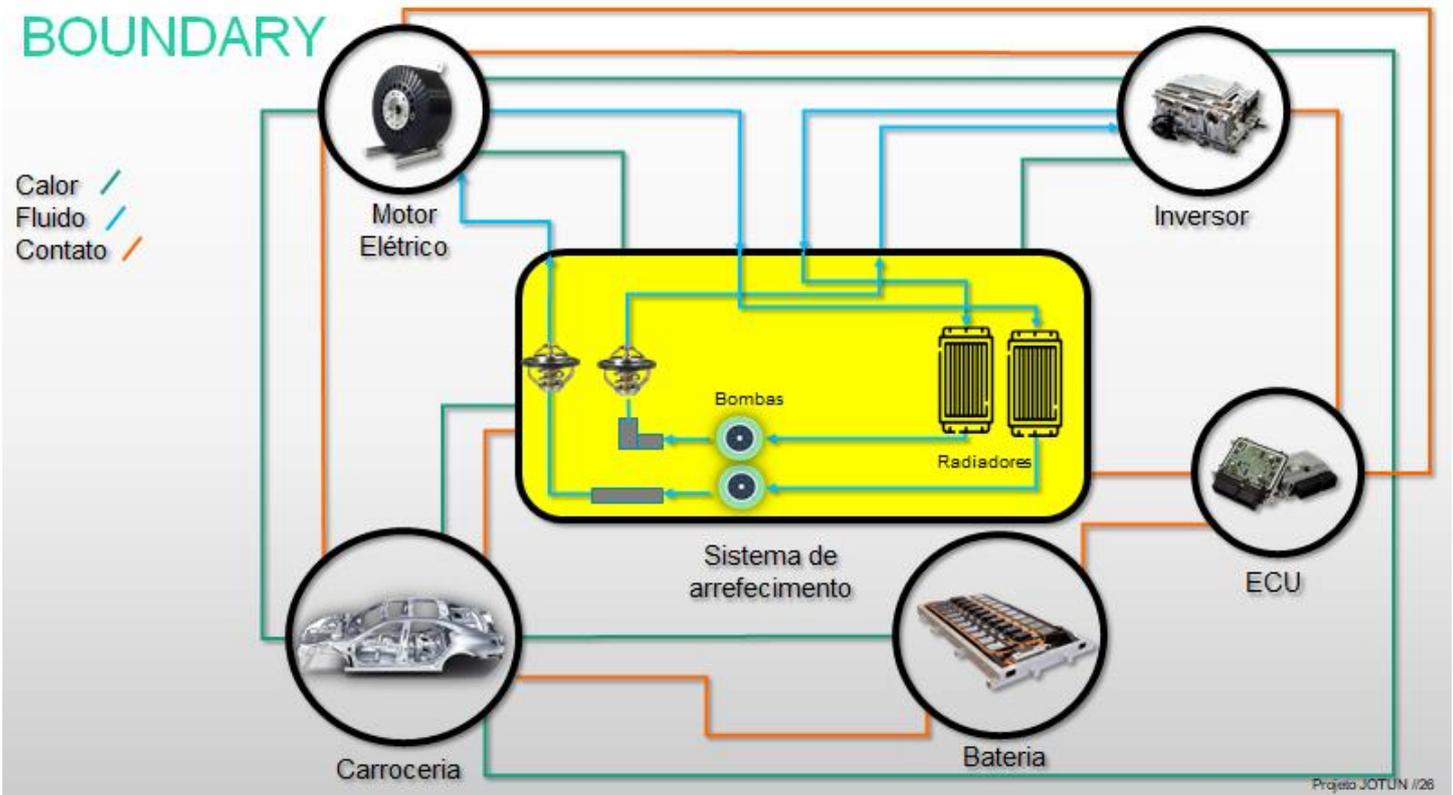
WU, Yu *et. al.* Real-time energy management of photovoltaic-assisted electric vehicle charging station by Markov decision process. **Journal of Power Sources**, v. 476, 2020.

ZHAO, Yan, *et. al.* Modeling of the effects of thermal gradients induced by tab and surface cooling on lithium-ion cell performance. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 165, n. 13, 2018.

ZHANG, Chi *et. al.* A SiC-Based 100 kW High-Power-Density (34 kW/L) Electric Vehicle Traction Inverter. In: IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, USA, 23-27 set. 2018. **Congress Paper**. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8558373>. Acesso em 21 de outubro de 2020.

ZHANG, Guiying *et. al.* Experimental study on a dual parallel evaporator heat pump system for thermal management of electric vehicles. **Energy Procedia**, v. 105, pp. 2390-2395, 2017.

APÊNDICE A – BOUNDARY DIAGRAM



APÊNDICE B – ANÁLISE DE VALOR

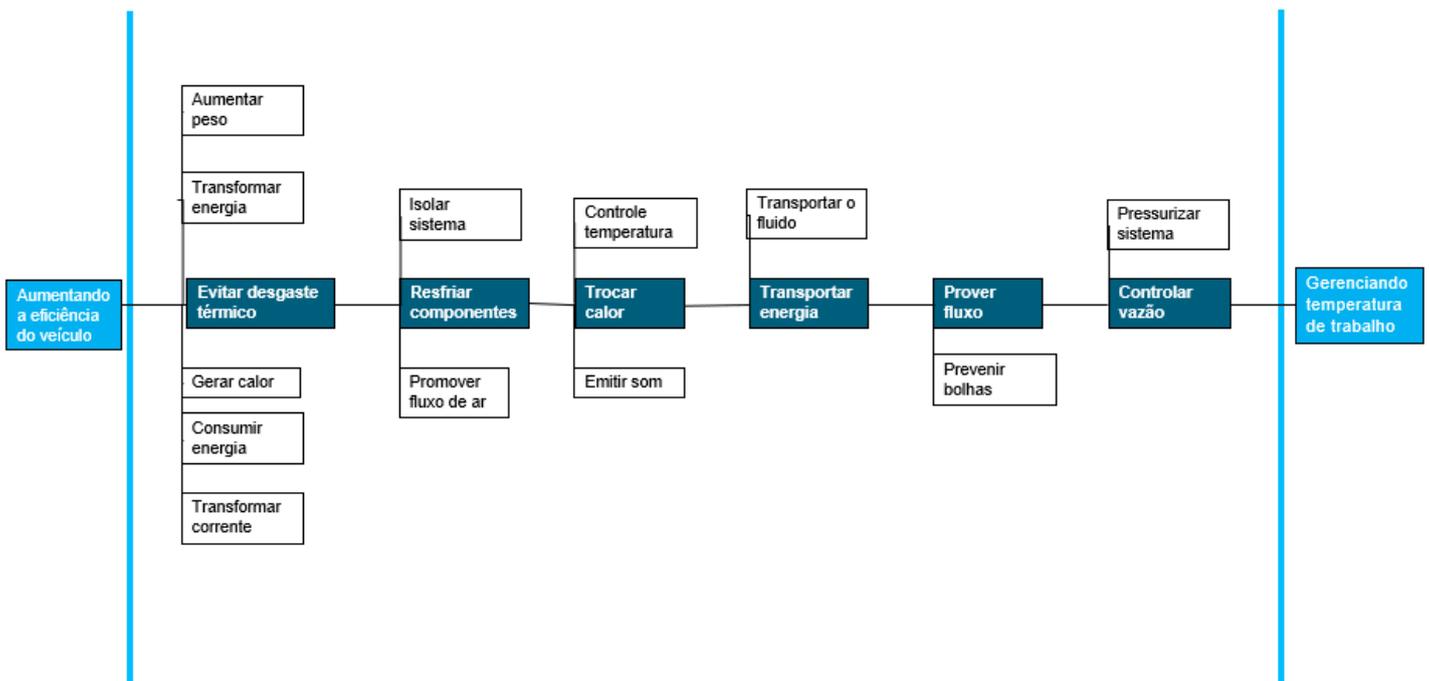
ANÁLISE DE VALOR

COMPONENTE		FUNÇÃO	CLASSIFICAÇÃO		
		FUNÇÃO	B/S	“+/0/-”	U/E
1	Radiador	Trocar calor	B	(+) / (-)	U
		Aumentar o peso			
2	Ventoinha	Promover fluxo de ar	S	(+) / (-)	U
		Emitir som			
		Aumentar peso			
3	Tubos	Transportar o fluido	S	0	U
		Trocar calor			
		Isolar o sistema			
		Evitar desgaste térmico			
4	Líquido arrefecimento	Trocar calor	S	0	U
		Prevenir bolhas			
		Lubrificar componentes			
		Transformar energia			
5	Motor elétrico	Gerar calor	S	0	U
		Aumentar o peso			
		Consumir energia			
		Transformar corrente			
6	Inversor	Gerar calor	S	0	U
		Aumentar o peso			
		Consumir energia			
		Controlar temperatura			
7	Válvula Controle	Controlar de Vazão	S	(+) / (-)	U
		Consumir energia			
		Pressurizar sistema			
8	Bomba d' água	Promover fluxo	S	0	U
		Consumir energia			
		Consumir energia			

Legenda:

B/S – Básico/ Secundário
 +/0/- - Relevante/
 irrelevante/indesejável
 U/E – Uso/Estética

ANÁLISE DE VALOR

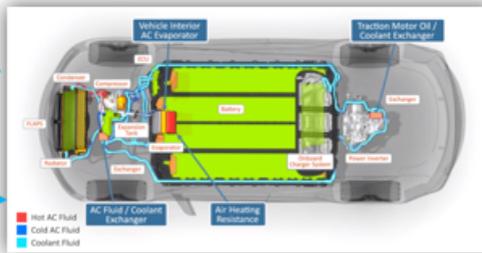


APÊNDICE C – P-DIAGRAM

P-DIAGRAM

CONTROL FACTORS		
1. Sensores de temperatura;	7. Área aleatada do radiador	13. Rotação da ventoinha
2. Programação da ECU para temperaturas ótimas de trabalho;	8. Package/instalação dos tubos	14. Vazão fornecida pela ventoinha
3. Controle de pressão para linhas diferentes de arrefecimento.	9. Diâmetro e material dos tubos	15. Direcionamento do ar ao passar pela ventoinha
4. Composição química do fluido de arrefecimento: formação de bolhas, coeficiente de troca térmica, viscosidade, pH etc.	10. Velocidade do fluido de arrefecimento	16. Tensão/corrente de uso do motor elétrico
5. Lubrificação da bomba d'água e da válvula termostática	11. Rotação da bomba d'água	17. Potência e rotação do motor elétrico
6. Quantidade de ar que entra no radiador	12. Vazão fornecida pela bomba d'água	18. Frequência e amplitude de corrente do inversor

INPUTS
1. Pressão;
2. Energia térmica;
3. Líquido de arrefecimento
4. Ar no radiador



IDEAL RESPONSES
1. Sistema de arrefecimento manter o motor elétrico e o inversor trabalhando em suas faixas ideais de temperatura

ERROR STATES
1. Sistema de arrefecimento incapaz de controlar as temperaturas do motor e do inversor dentro da faixa ideal

NOISE FACTORS		
- Piece to piece	- Wearout	- Customer usage
1. Dilatação dos componentes do sistema de arrefecimento;	1. Corrosão;	1. Estilo de condução;
2. Materiais com diferentes propriedades térmicas;	2. Desgaste térmico do material;	2. Manutenção adequada;
3. Processo de montagem.	3. Desgaste da vedação;	3. Uso durante falhas.
	4. Desbalanceamento do rotor do motor.	
- External	- System interactions	
1. Temperatura do ambiente;	1. Influência da temperatura dos demais componentes de powertrain, bateria etc.	
2. Vazão/velocidade do ar que entra no radiador;	2. Vibrações	
3. Condição da pista.		

APÊNDICE D – ENGENHARIA REVERSA

ENGENHARIA REVERSA

								
Componentes	Radiador	Motor elétrico	Inversor	Bomba d' água	Tubos	Líquido de arrefecimento	Válvula Controle	Ventoinha
Peso [Kg]	2,8	9,1	7,5	0,96	0,06	1	0,675	3
Quantidade [unid]	1	1	1	2	5	1	1	1
Custo [R\$]	820	80.000	13.000	100	30	60	60 - 700	100
Fornecedor	Valeo	<u>Emrax</u>	<u>Rinehart Motion</u>	Takao	<u>Valclei</u>	<u>Max Wurth</u>	Mahle	<u>Royce connect</u>

APÊNDICE E – FMEA

SFMEA - System Failure Mode and Effect Analysis

<u>System:</u>	Chassis and Thermal Management/Electric Propulsion	<u>Responsible:</u>	Jotun Group	<u>FMEA Number:</u>	###
<u>Subsystem:</u>	Cooling system/Electric engine and inverter	<u>Key Date:</u>	December 12th, 2020	<u>Page:</u>	1
<u>Component:</u>	Radiator, pipes, water pump, thermostatic valve, fan	<u>Prepared by:</u>	Lucas Galdino, Gabriela, Pedro, Orlito		
<u>Core Team:</u>	Jotun group (Lucas Galdino, Luca Bortali, Lucas Brito, Gabriela Lech, Pedro Moreira, Filipe Faria, Orlito Nunes, Rafael Velho)				

Item	Function	Requirement	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Severity	Classification	Potential Cause(s) of Failure	Current Controls Prevention	Occurrence	Current Controls Detection	Detection	RPN	Recommended Action(s)	Responsibility
Radiador	Trocar Calor	Manter o fluido em sua temperatura ideal para a devida troca de calor	Não manterá o fluido em sua faixa ideal de temperatura	O liquido de arrefecimento não irá manter a faixa de temperatura ideal diminuindo a vida útil dos componentes	7	Grave	Mal dimensionamento do trocador de calor	Realização de testes de bancada	2	Utilização de termopar na entrada e saída do radiador	1	14	Utilização de cabo OBD para coletar informações dos termopares em conjunto com software, a fim de averiguar a saúde do sistema de arrefecimento	Grupo Jotun
					Realização de simulações computacionais	Grupo Jotun								
					Diminuir a autonomia do veículo	5	Essencial	Trocas térmicas insuficientes	Revisão da características de controle da válvula termostática	4	Utilização de sensor em conjunto ao termopar, gerando sinal no painel do veículo	3	60	Dimensionamento da grade frontal do veículo afim de proporcionar a maior entrada de ar e utilização do cabo OBD para coletar informações e

													analisá-las em software	
			Vazamento que permitirá o escape do fluido	Não realizar nenhuma troca de calor	8	Crítico	Trinca na serpentina do radiador	Utilização de material de maior resistência a impacto	3	Sensor de pressão, acusando caso haja alteração na pressão interna do radiador	3	72	Dimensionamento da grade frontal do veículo afim de proporcionar a maior entrada de ar e concomitantemente a maior proteção para o radiador	Grupo Jotun
Ventoinha/rotor	Promover fluxo de ar	Ajudar no resfriamento do líquido de arrefecimento	Gerar um fluxo de ar insuficiente	O líquido de arrefecimento não irá manter a faixa de temperatura ideal	6	Significativo	Rotação inadequada da ventoinha	Utilização de rotor de melhor balanceamento	2	Utilização de amperímetro, verificando se a passagem de corrente está sendo feita de maneira adequada	2	24	Realização de manutenções regulares em concessionárias e/ou oficinas de confiança, para verificar a saúde e eficiência do sistema de arrefecimento, em específico a ventoinha	Grupo Jotun
			Não gerar o fluxo de ar para a troca de calor	Não resfriar o fluido de arrefecimento	7	Grave	Leitura inadequada de temperatura pode fazer a ventoinha não funcionar como deveria	Monitoramento da saúde do sensor PWM	2	Utilização de sensor PWM	4	56		Grupo Jotun
Tubos	Transportar o fluido	Levar o fluido ao radiador para ser resfriado e transportar ao sistema de arrefecimento na temperatura ideal de cada componente	Possíveis trincas, furos que propiciam o vazamento do fluido	Impedir a troca de calor impactando a vida útil dos componentes eletrônicos	8	Crítico	Craquelar o tubo devido a variação de temperatura constante	Utilização de material com maior resistência à fadiga térmica	7	Utilização de corantes sinalizadores da vida útil da tubulação, afim de mostrar visualmente ao condutor a necessidade de troca dos tubos	8	448	Substituição do(s) tubo(s) defeituoso(s)	Grupo Jotun
				Diminuição da troca de calor	7	Grave						392		Grupo Jotun
	Isolar o sistema	Impedir a entrada de ar no sistema	Furo ou trinca antes da bomba,	Diminuição da troca de calor	7	Grave						392		Grupo Jotun

			possibilitando a entrada de ar no sistema	Degradar a bomba responsável por pressurizar o fluido	6	Significativo					336		Grupo Jotun	
		Garantir a vedação do sistema	Vazamentos de fluido nas junções	Diminuição da troca de calor	7	Grave	Corrosão pela falta de aditivos ou uso de aditivos impróprios no fluido de arrefecimento	Orientações quanto ao uso dos aditivos adequados	1	Realização do teste hidrostático para averiguar a possibilidade de vazamento	2	14	Seguir as normas ABNT NBR 1307 (aditivos para arrefecimento) e ABNT NBR 14261 (solução arrefecedora)	Grupo Jotun
				Degradação da bomba	6	Significativo						12		Grupo Jotun
Fluido de arrefecimento	Previne bolhas	Impedir a formação de bolhas de ar no interior dos tubos	Formação de bolhas de ar	Degradação da bomba	7	Significativo	Composição química	Utilização de fluido mais quimicamente estável, afim de prevenir a formação de bolhas por agitação	1	Testes laboratoriais feitos pelo fornecedor do fluido, afim de garantir o atendimento às especificações do projeto/PPAP	2	14	Análise das engenharias de fornecedor e montadora a fim de verificar se o fluido é adequado para uso no veículo + sensor de pureza do fluido, averiguando se o fluido colocado no veículo atende às recomendações do fabricante	Grupo Jotun
				Troca de calor ineficiente	7	Grave	Agitação do líquido		1		4	28		Grupo Jotun
	Lubrificar a bomba d'água e válvula termostática	Diminuição do atrito interno	Falta de lubrificação da bomba e da válvula termostática	Superaquecer a bomba e/ou a válvula termostática devido ao aumento de atrito	8	Crítico	Falta de aditivos ou uso de aditivos impróprios	Orientações quanto ao uso dos aditivos adequados	1		2	16	Seguir as normas ABNT NBR 1307 (aditivos para arrefecimento) e ABNT NBR 14261 (solução arrefecedora)	Grupo Jotun
	Dissipar calor	Controle de temperatura	Troca de calor menor do que o valor especificado	Diminuição da vida útil dos componentes devido o aumento de temperatura	7	Essencial	Composição química não adequada	Utilização do fluido adequado, seguindo as orientações da montadora	1		2	14		Grupo Jotun
Válvula Termostática	Medir temperatura	Medir a temperatura do fluido para	Controle inadequado	Superaquecer o motor/inversor	8	Crítico	Leitura errônea da temperatura	Realização de testes de bancada	2	Sensor de temperatura aceso no	4	64	Programar código de erro específico, baseado na troca	Grupo Jotun

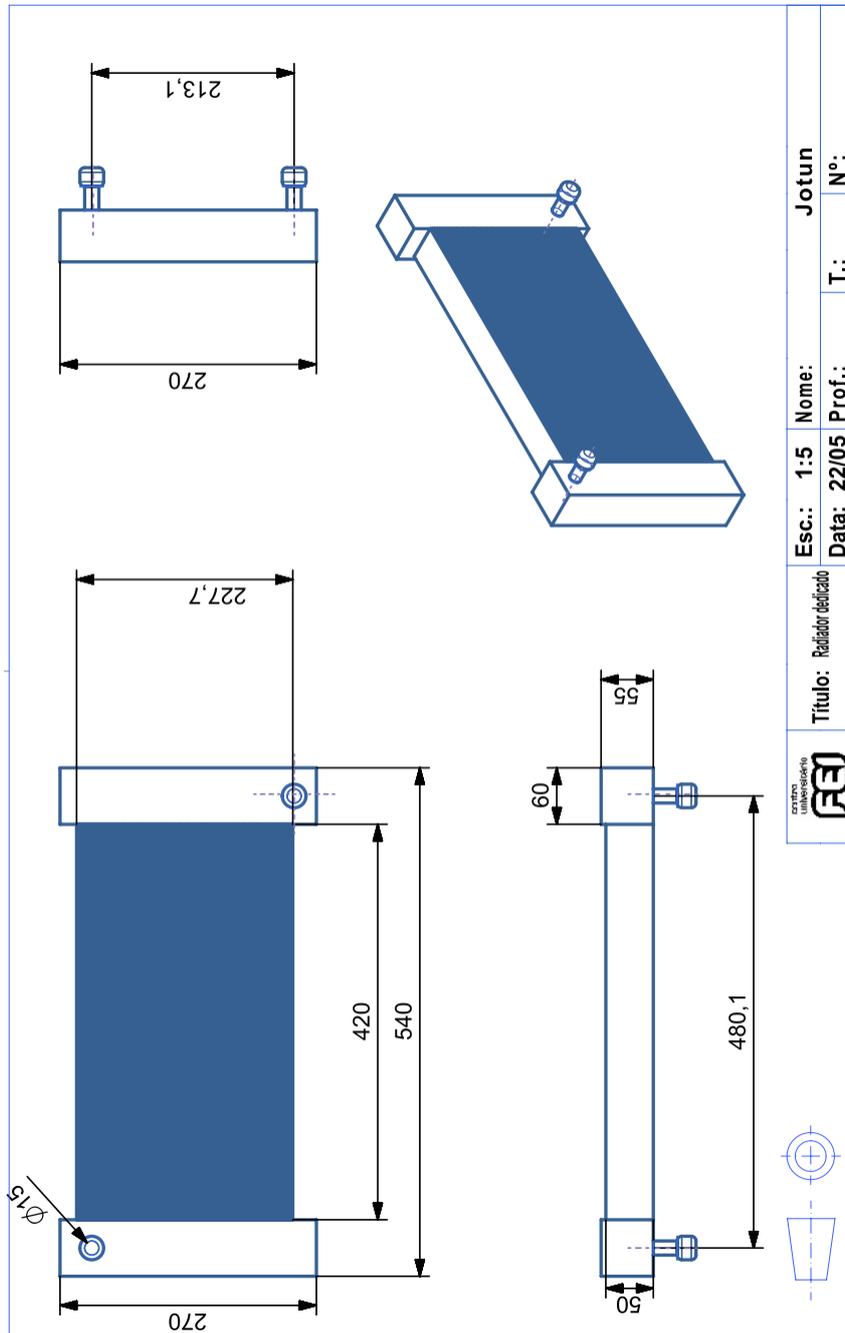
		controlar a temperatura do motor e do inversor	de temperatura	Troca de calor excessiva resfriando o motor/inversor abaixo do ponto ótimo de trabalho	5	Significativo	Válvula não funcionar	mecânicos e elétricos	2	painel do veículo	3	30	de calor necessária e efetiva + Programar código de erro específico, baseado na troca de calor necessária e efetiva +	Grupo Jotun
	Controle de vazão	Interromper ou não a comunicação entre o motor e radiador de forma gradativa	Interromper a vazão em momento inadequado	Superaquecer o motor/inversor, o que pode danificar os componentes	8	Crítico	Leitura errônea da temperatura		2		4	64	Programar código de erro específico, baseado na troca de calor necessária e efetiva +	Grupo Jotun
Quebra mecânica da válvula							1		2		16	reforços na construção da válvula, dificultando quebras	Grupo Jotun	
Leitura errônea da temperatura			2	4	40	Programar código de erro específico, baseado na troca de calor necessária e efetiva +	Grupo Jotun							
Quebra mecânica da válvula			1	2	10	reforços na construção da válvula, dificultando quebras	Grupo Jotun							
Bomba d'agua	Pressurizar sistema	Fonecer energia ao fluido	Bomba não fornecerá a energia necessária para o fluido	Haverá pouco/nenhum fluxo, o que pode superaquecer o motor ou inversor	8	Crítico	Escolha inadequada da bomba	Simulação computacional validando a escolha do modelo a ser utilizado	1	PPAP	2	16	Análise das engenharias de fornecedor e montadora afim de averiguar a capacidade da bomba de fornecer energia para o fluido	Grupo Jotun
							Cavitação	Bombeamento do fluido na velocidade correta, evitando choques no interior da carcaça da bomba	5	Sensor de pressão aceso no painel do veículo, acusando pressão inadequada na tubulação	3	120		Grupo Jotun
								Posicionamento correto da bomba						Grupo Jotun

	Promover fluxo	Movimentar o fluido pela tubulação	O fluido terá pouca velocidade	O sistema não ira trabalhar na faixa ideal de temperatura	7	Grave	Entrada de ar no sistema	Sangria do sistema feita de maneira adequada	5		8	280	Manutenção periódica do sistema	Grupo Jotun
--	----------------	------------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------------------------------	---	-------	--------------------------	----------------------------------------------	---	--	---	-----	---------------------------------	-------------

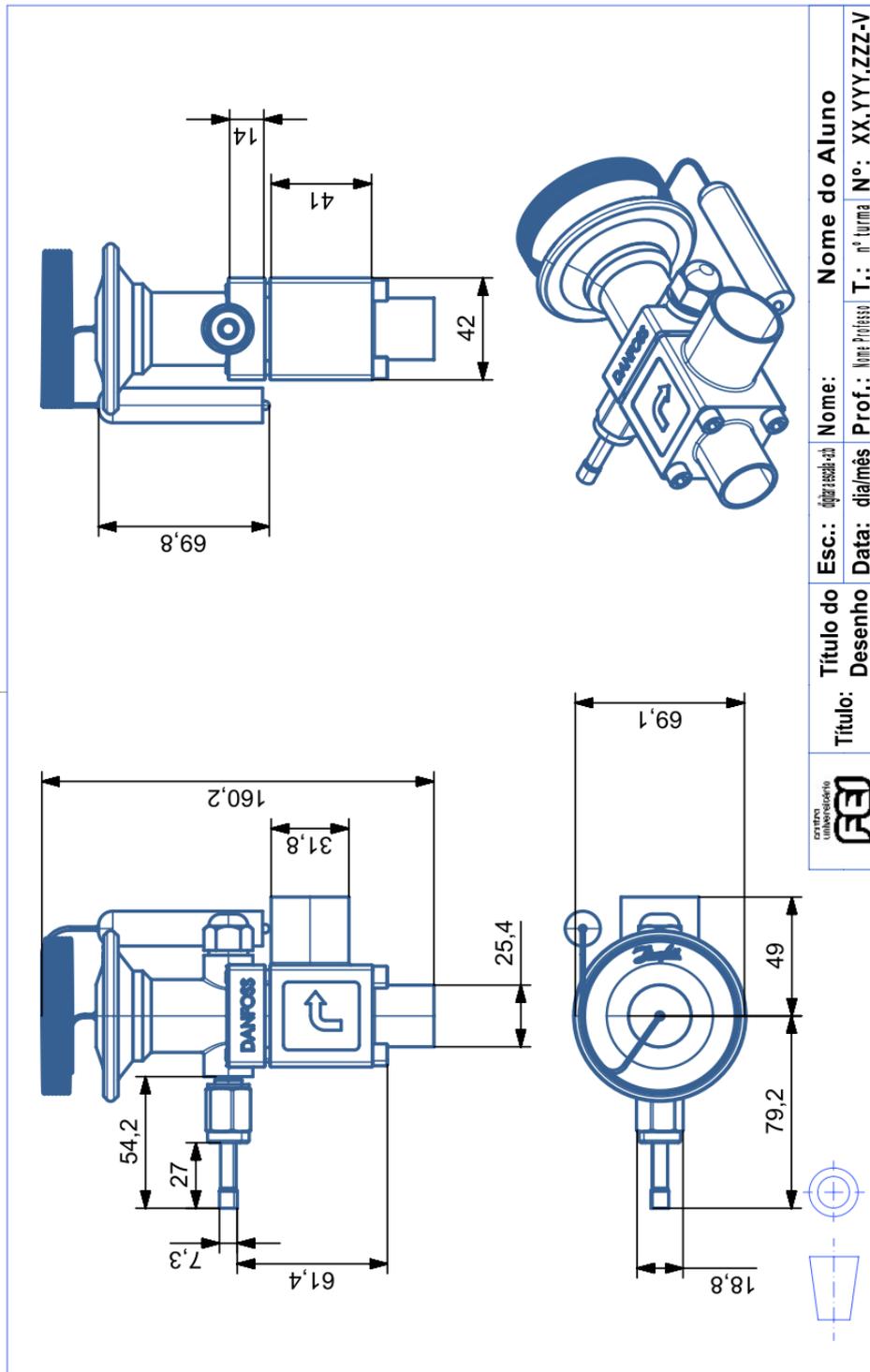
**APÊNDICE G – TABELA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS
CONSIDERADOS NO TRABALHO**

Tabela de propriedades dos materiais		
Condutividade térmica fluido - k_{fluido}	0,4151	W/K.m
Calor específico do fluido - Cp_{fluido}	3681,92	J/Kg.K
Densidade do fluido - ρ_{fluido}	1015,57	Kg/m ³
Viscosidade dinâmica do fluido - μ_{fluido}	0,0007441	Pa.s
Condutividade térmica do ar - k_{ar}	0,02663	W/K.m
Calor específico do ar - Cp_{ar}	1004,16	J/Kg.K
Densidade do ar - ρ_{ar}	1,137	Kg/m ³
Viscosidade dinâmica do ar - m_{ar}	0,00001912	Pa.s

APÊNDICE H – DESENHO RADIADOR

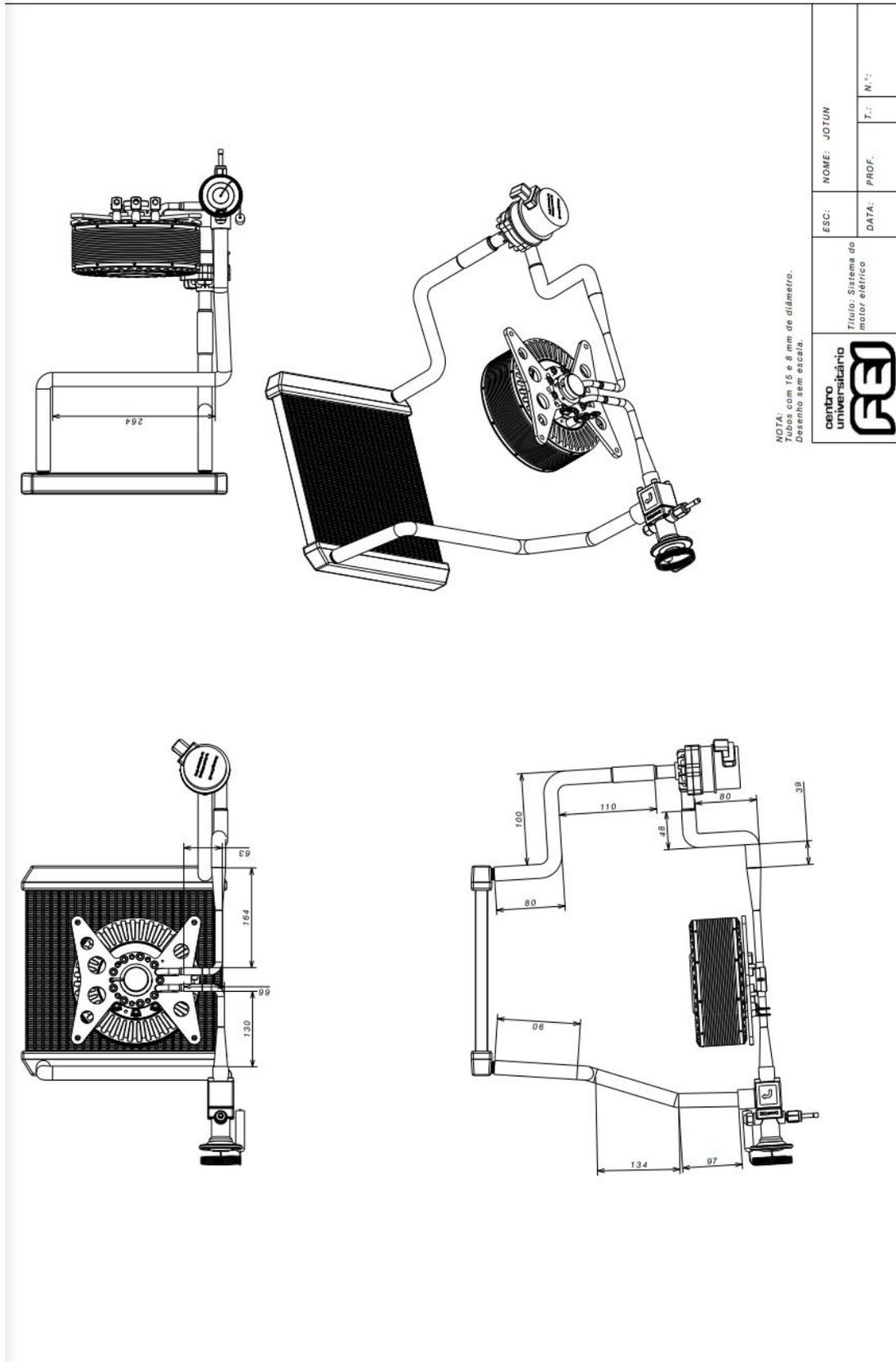


APÊNDICE I – DESENHO VÁLVULA TERMOSTÁTICA



	Título do Desenho	Nome do Aluno
	Título:	Nome:
Esc.: 1:1	Data:	Prof.:
	dia/mês	T.: nº turma N°: XX.YYY.ZZZ-V

APÊNDICE J – DESENHO DA MONTAGEM ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DEDICADO DO MOTOR ELÉTRICO



APÊNDICE K – DESENHO DA MONTAGEM ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DEDICADO DO INVERSOR

