



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Lucas de Moraes Silva

**Proposta de design de um sistema de banco de baterias para carro
de fórmula SAE**

Recife
2024

Lucas de Moraes Silva

**Proposta de design de um sistema de banco de baterias para carro de fórmula
SAE**

Monografia submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, para conclusão do curso de Graduação em Engenharia Mecânica

Orientadora: Dra. Janaina Moreira de Meneses

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Lucas de Moraes.

Proposta de design de um sistema de banco de baterias para carro de fórmula SAE / Lucas de Moraes Silva. - Recife, 2024.

49 p. : il., tab.

Orientador(a): Janaina Moreira de Meneses

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. Acumulador. 2. Carro elétrico. 3. Baterias. 4. Fórmula SAE. 5. Modelagem 3D. I. Meneses, Janaina Moreira de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de
Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2

Ao 17º dia do mês de outubro do ano de dois mil e vinte e quatro, às 14:00 horas, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **Proposta de design de um sistema de banco de baterias para carro de fórmula SAE**, elaborado pelo aluno **Lucas de Moraes Silva**, matrícula 20180029147, sob a orientação da Profa. **Janaina Moreira de Meneses**. A banca foi composta pelos avaliadores: Profa. **Janaina Moreira de Meneses** (orientadora), Prof. **Guilherme Medeiros Soares de Andrade** (avaliador), e Prof. **José Rodrigues de Oliveira Neto** (avaliador). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua Aprovação, atribuindo-lhe a média 8,5, julgando-o apto(x) / inapto() à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientadora:	Profa. Janaina Moreira de Meneses	Nota: 8,5
Assinatura	Documento assinado digitalmente  JANAINA MOREIRA DE MENESES Data: 20/10/2024 19:44:48-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	_____
Avaliador Interno:	Prof. Guilherme Medeiros Soares de Andrade	Nota: 8,5
Assinatura	Documento assinado digitalmente  GUILHERME MEDEIROS SOARES DE ANDRADE Data: 20/10/2024 19:52:18-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	_____
Avaliador Interno:	Prof. José Rodrigues de Oliveira Neto	Nota: 8,5
Assinatura	Documento assinado digitalmente  JOSE RODRIGUES DE OLIVEIRA NETO Data: 21/10/2024 06:49:06-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	_____

Recife, 17 de outubro de 2024.

Prof. Marcus Costa de Araújo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

Agradecimentos

Agradeço primeiro a Deus por ter me mantido na trilha certa durante este projeto de pesquisa com saúde e forças para chegar até o final. Agradeço especialmente a minha orientadora Dra. Janaina Moreira de Meneses por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa.

A todos os meus professores do curso pela excelência da qualidade técnica de cada um. Sou grato à minha família pelo apoio que sempre me deram durante toda a minha vida. Ao projeto de extensão Capibarib-E Racing e seu integrantes. A todos os amigos que fiz durante minha graduação que sem me apoiaram e incentivaram.

*“A persistência é o caminho do êxito.”
(Autor: Charles Chaplin)*

Resumo

A utilização e desenvolvimento de carros elétricos tem sido impulsionados pela demanda por soluções mais sustentáveis e a necessidade de reduzir a emissão de gases poluentes. Porém, o desenvolvimento das baterias para carros elétricos enfrenta grandes desafios, sendo os dois principais a baixa autonomia das baterias e o custo de aquisição muito elevado. Desafios estes que também tem sido obstáculos para o projeto de extensão da Universidade Federal de Pernambuco, Capibarib-E Racing, projeto esse voltado para concepção de carro do tipo monoposto para competição estudantil Fórmula SAE. Diante disso, o objeto desse trabalho é desenvolver o projeto conceitual de um banco de baterias para ser utilizado pela equipe na competição. Sendo necessário para isso, realizar dimensionamento da energia necessária para gerar a autonomia exigida para o modelo por meio de simulação computacional, via *Optimum Lap*, escolha de célula de bateria ideal e cálculos para atingir a tensão e corrente elétricas, por meio de planilhas eletrônicas, para atingir a demanda dos motores e modelagem 3D de componentes mecânicos que acomodaram todas essas baterias, via *Solidworks*. Com isso, é possível desenvolver um modelo de banco de baterias que atende tanto às exigências do regulamento quanto aos requisitos dos testes práticos da competição. Se mostrando uma proposta viável para desenvolvimento e adaptação no projeto do carro.

Palavras-chaves: Acumulador, Carro elétrico, Bateria, Fórmula SAE, Modelagem 3D.

Abstract

The use and development of electric cars have been driven by the demand for more sustainable solutions and the need to reduce the emission of polluting gases. However, the development of batteries for electric cars faces major challenges, the two main ones being the low autonomy of the batteries and the very high acquisition cost. These challenges have also been obstacles for the extension project of the Federal University of Pernambuco, Capibarib-E Racing, a project aimed at designing a single-seater car for the Formula SAE student competition. In view of this, the objective of this work was to develop the conceptual design of a battery bank to be used by the team in the competition. Using computer simulation via *Optimum Lap* to dimension the energy needed to generate the autonomy required for the model, electronic spreadsheets to choose the ideal battery cell, and calculations to achieve the electrical voltage and current, according to the arrangement of the electrical connections of the cells, to meet the demand of the engines that the team has and 3D modeling, via *solidworks*, to design the mechanical components that accommodate all these batteries. This made it possible to develop a battery bank model that meets both the requirements of the regulations and the requirements of the competition's practical tests. This proved to be a viable proposal for development and adaptation in the car's design.

Key-words: Accumulator, Electric car, Battery, Formula SAE, 3D modelin.

Lista de figuras

Figura 1 – Layout do <i>Skidpad</i>	17
Figura 2 – Vista explodida dos componentes do carro	18
Figura 3 – Triangulação do chassi	19
Figura 4 – Sistema de suspensão	20
Figura 5 – Arrefecimento líquido motor	21
Figura 6 – Arrefecimento a ar em acumulador	21
Figura 7 – Sistema de direção	22
Figura 8 – Acumulador	24
Figura 9 – Célula <i>Pouch</i>	24
Figura 10 – Célula Cilíndrica	25
Figura 11 – Contêiner com 5 seguimentos	25
Figura 12 – Exemplo conjunto de células	26
Figura 13 – Fluxograma de projeto	28
Figura 14 – Exemplo de simulação via <i>Optimum Lap</i>	30
Figura 15 – Corpo da estrutura principal	35
Figura 16 – Tampa	36
Figura 17 – Fixadores no chassi	36
Figura 18 – Molde superior	36
Figura 19 – Moldes esquerdo e direito	37
Figura 20 – Molde inferior	37
Figura 21 – Montagem dos moldes	37
Figura 22 – <i>maintenance plug</i>	38
Figura 23 – Solda ponto entra células e <i>busbar</i>	38
Figura 24 – Busbar intermediário na montagem e isolado	38
Figura 25 – Busbar das pontas	39
Figura 26 – Caixa do stack	39
Figura 27 – Chapa superior dos stacks	40
Figura 28 – Cooler	40
Figura 29 – BMS central	40
Figura 30 – Coolers para entrada de ar	47
Figura 31 – Espaço reservado para circuitos do bms	47
Figura 32 – Montagem completa	48
Figura 33 – Montagem completa sem tampa	48
Figura 34 – Seguimento montado com busbar	48

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tipos de chassi	19
Tabela 2 – Dados de entrada para simulação	30
Tabela 3 – Componentes do acumulador	31
Tabela 4 – Resultados da simulação	32
Tabela 5 – Células variáveis unitárias	33
Tabela 6 – Especificações calculadas	33
Tabela 7 – Célula escolhida	34
Tabela 8 – Componentes do acumulador	35
Tabela 9 – Massa dos componentes do acumulador	41

Lista de abreviaturas e siglas

SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade de engenheiros automotivos)
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
FSAE	Fórmula SAE
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
LTS	<i>Lap Time Simulation</i> (Simulação de Tempo de Volta)

Lista de símbolos

I_{conv}	Corrente elétrica do conversor	A
I_{bat}	Corrente elétrica da bateria	A
N_s	Número de células em série	
N_p	Número de células em paralelo	
N_t	Número de células total	
V_{conv}	Tensão do conversor	V
V_{bat}	Tensão da bateria	V
V_{cel}	Tensão da célula	V
C_{ah}	Unidade de carga elétrica da célula	mAh
E_t	Energia total	Wh
A_c	Corrente fornecida pela célula	Ah

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	14
1.2	JUSTIFICATIVA	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	A competição FSAE	16
2.1.1	<i>Provas estáticas</i>	16
2.1.2	<i>Provas dinâmicas</i>	17
2.2	Componentes do carro de competição FSAE	17
2.2.1	<i>Chassi</i>	18
2.2.2	<i>Freios</i>	19
2.2.3	<i>Suspensão</i>	19
2.2.4	<i>Arrefecimento</i>	20
2.2.5	<i>Direção</i>	21
2.2.6	<i>Powertrain mecânico</i>	22
2.2.7	<i>Powertrain elétrico</i>	22
2.2.8	<i>Aquisição de dados</i>	23
2.2.9	<i>Circuitos de segurança</i>	23
2.2.10	<i>Acumulador</i>	23
2.2.10.1	<i>Células de bateria</i>	24
2.2.10.2	<i>Contêiner e regras</i>	25
2.3	DIMENSIONAMENTO DA QUANTIDADE DE CÉLULAS	26
3	METODOLOGIA	28
3.1	Etapas do projeto	28
3.1.1	<i>Simulação do tempo de volta</i>	29
3.1.2	<i>Escolha e alocação das células</i>	30
3.1.3	<i>Modelagem da estrutura</i>	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1	Escolha de célula e alocação	32
4.2	Estrutura modelada	34
4.2.1	<i>Estrutura principal</i>	34
4.2.2	<i>Moldes de acomodação das células no seguimento</i>	36

4.2.3	<i>Conexões</i>	38
4.2.4	<i>Isolamentos do seguimento</i>	39
4.2.5	<i>Periféricos do seguimento</i>	40
4.2.6	<i>Massa do acumulador</i>	41
5	CONCLUSÕES	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
	ANEXO A – IMAGENS DA MONTAGEM DO CONTÊINER	47

1 Introdução

De acordo com a Associação Brasileira do Veículo Elétrico, o Brasil já conta com mais de 8 mil veículos elétricos em circulação, entre carros, motos e ônibus (ELÉTRICOS, 2023). Embora ainda representem uma pequena parcela do mercado automotivo, os carros elétricos têm um grande potencial para ajudar a reduzir as emissões de gases poluentes e contribuir para um futuro mais sustentável. Pois, esses tipos de carros são movidos a energia elétrica e, por conta disso, são menos poluentes por não emitirem dióxido de carbono como os veículos movidos a combustão. Quando analisados com veículos 100% elétricos, os gases causadores do efeito estufa reduziriam 80%, já os veículos híbridos, em 55% (MOORHOUSE; LAUFENBERG, 2010). Para que essa não emissão de gases poluentes seja possível, a bateria é necessária pois é o componente responsável por armazenar a energia elétrica para o funcionamento dos carros elétricos. Ela armazena a eletricidade em forma de energia química, que pode ser convertida em energia elétrica quando requisitada. Além de alimentar o motor, a bateria também fornece energia para outros sistemas, como eletrônicos e controles internos do carro. No entanto, conforme Santos (2021), as baterias ainda representam um dos principais desafios para a adoção em massa de veículos elétricos, devido ao seu elevado custo, limitações de autonomia e questões relacionadas ao descarte e reciclagem.

Atualmente, no âmbito universitário, o desenvolvimento de carros elétricos é muito difundido pela existência da *Society of Automotive Engineers* (SAE) que promove a competição Fórmula SAE (FSAE) que é uma competição realizada anualmente em diversos países, inclusive no Brasil, onde estudantes de engenharia projetam e montam veículos protótipos onde existe somente um lugar para passageiro, ou seja, o motorista. Esses veículos são submetidos a testes de segurança e teste em pista. A competição abrange diversas provas classificadas como estáticas e dinâmicas. As provas estáticas incluem apresentação de projeto, onde equipes explicam suas escolhas de design e estratégias de fabricação, inspeções de segurança e conformidade técnica. Já as provas dinâmicas se tem a utilização do protótipo em pista. Para todas as provas são atribuídas pontuações, que vão de acordo com a dificuldade de cada prova, e que somadas geram a pontuação geral da equipe na competição conforme o regulamento SAE (2023).

Os principais componentes de um carro elétrico conforme cita Larminie (2012) podem ser divididos em bateria elétrica, o motor elétrico e um controlador de motor. A bateria elétrica, também chamadas de acumulador, tem como principais funções fornecer energia, por meio das células de bateria, aos motores e proteger essas células

de bateria. Onde as células bateria são as de íon-lítio, que têm sido objeto de intenso estudo. Devido à sua alta densidade de energia, alta voltagem de célula, longa vida útil de armazenamento, baixa taxa de autodescarga e grande faixa de temperatura (CASTILLO, 2002). E para a proteção das células é projetado um contêiner para acomodação das células.

O presente estudo visa apenas desenvolver um projeto conceitual de um sistema de baterias (acumulador) de forma a atender às exigências estabelecidas pela FSAE. Bem como, alcançar um equilíbrio entre custo e peso reduzidos. Para tal desenvolvimento foram utilizadas simulação computacional da energia gasta pelo carro no percurso utilizado na competição brasileira, seguido da montagem de tabela para cálculo do número de células necessárias e comparativo de peso, preço e quantidade, entre algumas diversas células disponíveis no mercado brasileiro e internacional. Por fim, estudo de regra para distribuição das células dentro do contêiner além da utilização de software para modelagem computacional dos componentes do contêiner.

Após o desenvolvimento foi obtido um conceito de acumulador completo com dimensionamento de energia 13,2 MJ, suficientes para o enduro. Além projeto mecânico da estrutura do contêiner com 14 peças. Com preço das células de R\$ 31.660 e peso de 86,37 Kg, parâmetros relativamente aceitáveis para a categoria, utilizando tecnologias atuais como baterias de íon de lítio. Tal projeto foi essencial para dar início e servir como fonte de informação ao projeto completo do veículo Fórmula SAE.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um projeto conceitual de um acumulador de forma a atender às exigências de peso, densidade de energia e tensão, materiais e componentes mecânicos estabelecidas pela Fórmula SAE.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Realizar estudo para identificar número de voltas que o veículo deve realizar.
- Utilizar simulação computacional para quantificar a energia gasta pelo carro.
- Estudar a disposição das células nos seguimentos do acumulador.
- Realizar o desenvolvimento do projeto conceitual do contêiner.

1.2 JUSTIFICATIVA

Foi criada na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) a equipe Capibarib-E Racing no ano de 2018. Com o intuito de participar da competição da Fórmula SAE Brasil, a equipe pretende competir em âmbito nacional pela primeira vez nos próximos anos, para isso, se faz necessário a construção completa do veículo que atenda os requisitos do regulamento da Fórmula SAE. Ao longo dos últimos anos, em conjunto com o Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UFPE foi adquirido um conjunto com dois motores do modelo NOVA 15.

No entanto, o uso pleno desses motores está limitado pela ausência de um sistema de armazenamento de energia adequado, o acumulador, que armazena as células de bateria íon-lítio que geram a corrente elétrica para alimentação dos motores e que deve atender a uma série de critérios tanto para funcionamento correto junto ao conjunto de motores, quanto para atender aos critérios da Fórmula SAE. O desenvolvimento de um acumulador para veículos elétricos é um desafio relevante, uma vez que envolve não apenas a aplicação de conhecimentos teóricos em engenharia, mas também a solução de problemas práticos relacionados à eficiência energética, segurança e conformidade com normas rigorosas da competição.

O presente trabalho pretende resolver a questão crítica dentro do desenvolvimento do veículo elétrico da equipe Capibarib-E Racing: o projeto conceitual de um acumulador eficiente e seguro que atenda tanto às demandas técnicas dos motores NOVA 15, quanto aos rígidos critérios de segurança e regulamentação da FSAE. Além disso, o tema contribui de forma significativa para o crescimento da equipe, possibilitando a

primeira participação em âmbito nacional. A pesquisa visa preencher essa lacuna, desenvolvendo projeto conceitual de acumulador que otimize o desempenho dos motores, assegure a segurança dos componentes e cumpra os requisitos da FSAE.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, cada um cumprindo uma função específica na estrutura da pesquisa.

No primeiro capítulo, o tema é introduzido e contextualizado, mostrados os objetivos geral e específicos do trabalho. A justificativa da pesquisa é apresentada, destacando a relevância do tema escolhido.

O segundo capítulo trata a respeito da fundamentação teórica, onde os principais conceitos do trabalho serão explorados. Como a simulação computacional, dimensionamento do número de baterias, processo de disposição das células e desenvolvimento do projeto conceitual do contêiner.

No terceiro capítulo, a metodologia é descrita e detalhada, destacando as etapas da pesquisa, as ferramentas utilizadas e os procedimentos aplicados ao projeto do acumulador.

O quarto capítulo, é reservado para resultados e discussões, apresentando os resultados obtidos ao longo da pesquisa. Bem como, a aplicabilidade do resultado obtido.

No quinto e último capítulo, a Conclusão, é apresentada uma síntese dos principais resultados, oferecendo considerações finais sobre a pesquisa. Serão discutidas as contribuições do estudo, suas limitações e sugestões para pesquisas futuras.

2 Fundamentação Teórica

Nesta seção, são apresentados os conceitos, teorias e referências pertinentes que fundamentam este estudo, possibilitando uma contextualização do assunto e a definição dos fundamentos fundamentais para a interpretação dos resultados. Onde, serão abordados os principais aspectos relacionados as provas da competição da Fórmula SAE, componentes dos carros de competição e dimensionamento da quantidade de células

2.1 A competição FSAE

A competição da Fórmula SAE abrange diversas provas classificadas como estáticas e dinâmicas, especificadas nos itens "S" e "D" do Regulamento SAE (2023). Onde, as provas estáticas incluem a apresentação de projeto, na qual as equipes explicam suas escolhas de design e estratégias de fabricação, inspeções de segurança e conformidade técnica. No contexto das provas dinâmicas se tem a utilização do protótipo em pista. Para todas as provas são atribuídas pontuações, que somadas geram a pontuação geral da equipe na competição.

2.1.1 Provas estáticas

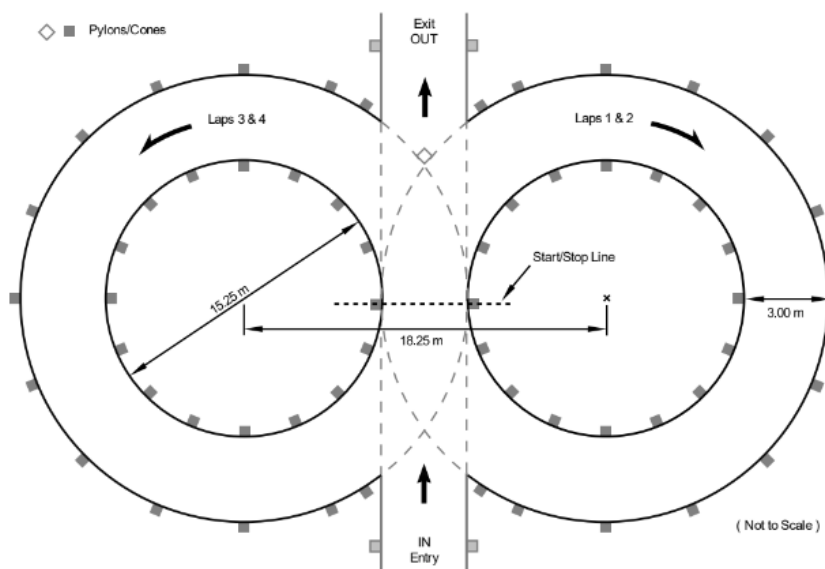
As provas estáticas são definidas na sessão "S" do Regulamento SAE (2023) páginas 118 até 123, sendo elas: *Presentation*, *Cost and Manufacture* e *Design*. Tais provas são feitas em forma de apresentação aos juízes, onde as equipes defendem sua concepção de projeto, mecanismos utilizados, resultados e etc.

O Evento de *Presentation* parte do pressuposto que cada equipe é uma empresa que desenvolve um veículo de alta performance e avalia a capacidade da equipe de desenvolver e apresentar um caso abrangente de negócios, logística, produção ou técnico que convença interesses externos a investir. O Evento de *Cost and Manufacture* avalia a capacidade da equipe de considerar o orçamento e incorporar considerações de produção para eficiência e produção. Tomar decisões de compensação entre conteúdo e custo com base no desempenho de cada peça e montagem, e contabilizar cada parte e processo para atender a um orçamento, faz parte da Gestão de Projetos. Já a prova de design como o veículo atende à intenção do mercado, tanto em termos de desempenho do veículo quanto de valor geral.

2.1.2 Provas dinâmicas

As provas dinâmicas são especificadas na seção "D" do Regulamento SAE (2023) mas páginas 125 até 140, são ao total 4 provas: *acceleration*, *skidpad*, *autocross* e *endurance*. O evento de *acceleration* avalia a aceleração do veículo em linha reta em pavimento plano, comprimento do percurso será de 75 m, da linha de largada até a linha de chegada e a largura do percurso será de no mínimo 4,9 m. A prova de *Skidpad* mede a capacidade de curva do veículo em uma superfície plana enquanto faz uma curva de raio constante, onde a pista é composta por dois pares de círculos concêntricos em um padrão de oito com centros dos círculos distanciados 18,25 m, círculos internos com diâmetro de 15,25 m e 3,0 m de largura entre os círculos interno e externo, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Layout do *Skidpad*



Fonte: Regulamento SAE (2023)

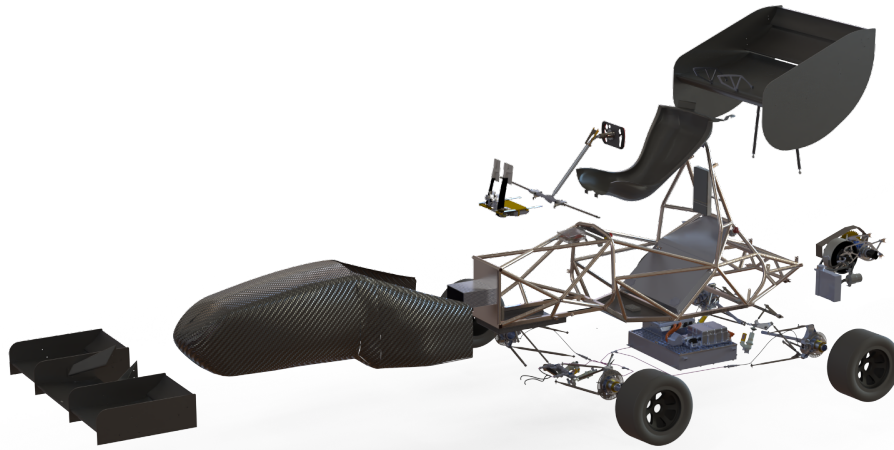
O evento *Autocross* avalia a manobrabilidade do veículo e suas qualidades de condução em um percurso fechado, composto por retas, curvas e um comprimento total de 0,8 Km. O evento de *Endurance* avalia o desempenho geral do veículo e testa sua durabilidade e confiabilidade que consiste em várias voltas em um percurso fechado com uma distância total de aproximadamente 22 km.

2.2 Componentes do carro de competição FSAE

Para a concepção do carro, a equipe Capibarib-E Racing optou por dividir o projeto do carro em duas áreas gerais: mecânica e elétrica. Além disso, dentro de cada área são divididos grupos para cada projeto da área, onde se tem, a área de mecânica os projetos de: chassi, suspensão, freios, arrefecimento, direção e *powertrain* mecânico e

para área de elétrica se tem os projetos de: *powertrain* elétrico, acumulador, aquisição de dados e circuitos de segurança. A Figura 2 mostra um vista explodido desses sistemas do carro.

Figura 2 – Vista explodida dos componentes do carro



Fonte: HyTech (2024)

2.2.1 Chassi

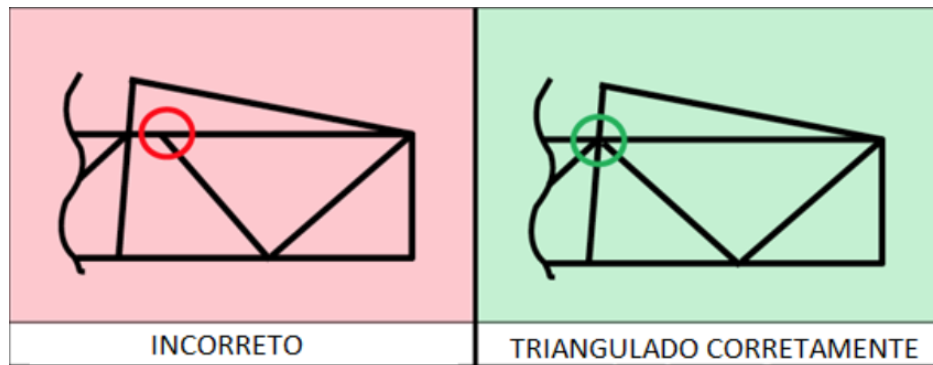
A estrutura do chassi é análoga ao esqueleto humano, que mantém todos os órgãos vitais no local correto e fornece ancoragem para os tendões e músculos para que movimentos e trabalhos úteis possam ser realizados (SEWARD, 2014). Trazendo tal analogia, o chassi garante a melhor fixação e acomodação de todos os componentes mecânicos e elétricos do carro, e ainda, suporta todos os esforços dinâmicos que são exercidos tanto nele quanto nos demais componentes que estão ligados a ele. Além disso, é responsável pela proteção do piloto em caso de colisão ou qualquer outro tipo de acidente em testes ou provas dinâmicas. Além disso, o chassi precisa ser leve para garantir agilidade e eficiência, enquanto mantém rigidez para oferecer estabilidade e resposta precisa nas curvas e em altas velocidades. E também, deve aderir estritamente aos regulamentos das federações de automobilismo e das categorias específicas. Essas regulamentações definem critérios para dimensões, materiais e técnicas de construção, assegurando a segurança dos pilotos e promovendo uma competição justa. Segundo Venâncio (2013), os chassis evoluíram para fornecer aos veículos performances cada vez mais interessantes. Podem-se referir 5 grandes tipos de chassis, conforme a Tabela 1.

Porém, os tipos de chassi mais utilizados na Fórmula SAE são os tubulares, mono-coque e combinados. Este trabalho aborda um veículo que utiliza um chassi tubular que é composto por tubos de seção circular ou quadrada, triangulados conforme demonstra a Figura 3 a forma correta de realizar essa triangulação.

Tabela 1 – Tipos de chassi

TIPOS
Chassis em escadas
Chassis cruciforme
Chassis tubular
Chassis monocoque
Chassis combinado
Fonte: autor

Figura 3 – Triangulação do chassi



Fonte: Regulamento SAE (2023)

2.2.2 Freios

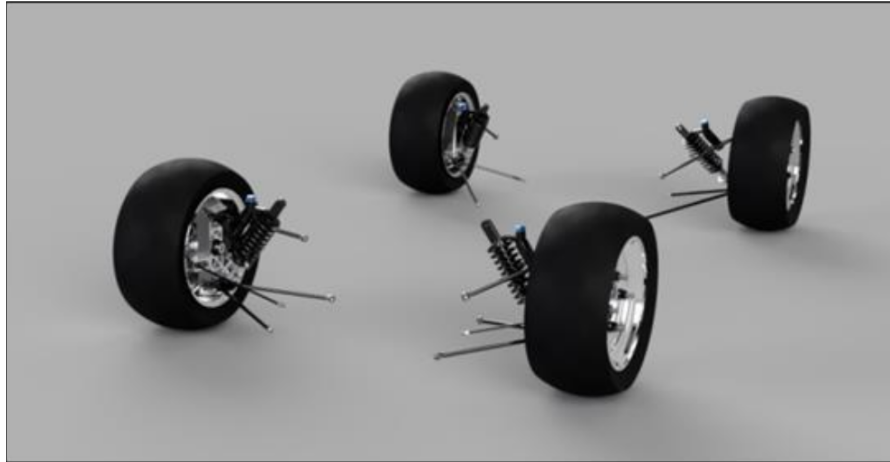
O sistema de freios é crucial para qualquer veículo. Segundo Limpert (2011, p. 1) "Desacelerar um veículo para uma velocidade mais baixa ou para parada completa é a função mais frequentemente realizada pelos freios de um veículo. Os padrões de segurança e as práticas de indústria colocam requisitos rigorosos sobre a eficácia das paradas, incluindo frenagens repetidas sob uma variedade de condições operacionais". O sistema de freios é constituído por um mecanismo hidráulico que transmite a força aplicada pelo piloto no pedal de freio para as pinças de freio, que travam o disco, componente acoplado à roda e que se move em conjunto com ela, fazendo com que tanto o disco como a roda parem de girar e dessa forma parar o carro. Segundo (SEWARD, 2014), um sistema de freios altamente eficaz é vital para bons tempos de volta, pois permite ao piloto manter altas velocidades durante mais tempo nas retas antes de travar tardiamente numa curva. Eles também são claramente uma medida de segurança vital.

2.2.3 Suspensão

Como explica Seward (2014) "A suspensão tenta manter as rodas no ângulo ideal em relação à superfície da pista em todos os momentos e sob todas as condições". Dessa forma, a suspensão é um sistema que busca dar sustentação ao chassi e a todos os componentes nele acoplados, manter os pneus em contato com o solo e absorver

todas as forças geradas na aceleração, frenagem e contorno de curvas do circuito, a Figura 4 exibe um sistema de suspensão completo para Fórmula SAE.

Figura 4 – Sistema de suspensão



Fonte: (WAGH, 2020)

2.2.4 Arrefecimento

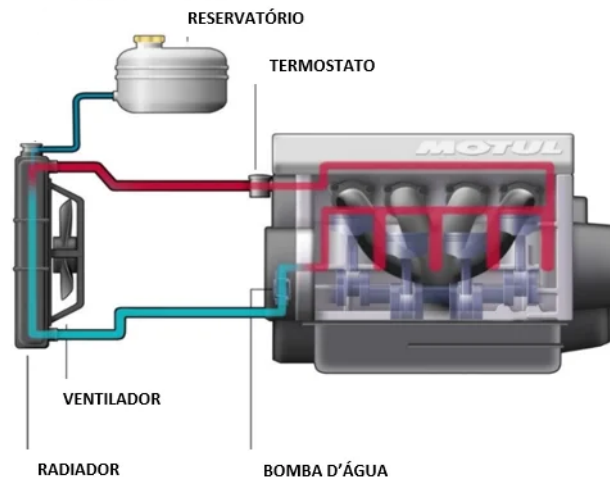
O sistema de arrefecimento é muito variável de acordo com o projeto do veículo, podem existir projetos sem a necessidade de arrefecimento. No entanto conforme explica Incropera *et al.* (2008), a transferência de calor desempenha um papel crucial no projeto de sistemas de arrefecimento, sendo essencial para manter a eficiência e a integridade térmica de componentes mecânicos e eletrônicos.

Para projetos de um Fórmula SAE, são utilizados principalmente sistemas de arrefecimento a ar e líquido. Os sistemas de arrefecimento a ar utilizam a condução e a convecção natural para dissipar calor, enquanto os sistemas a líquido empregam um fluido circulante para transferir o calor para um radiador, onde ele é removido de forma mais eficiente (INCROPERA *et al.*, 2008).

Existem duas situações principais onde um sistema de arrefecimento é utilizado no projeto de um Fórmula SAE, são elas: quando o motor requer arrefecimento para não superaquecer durante seu funcionamento, ou quando a bateria necessita de arrefecimento devido ao calor gerado nela durante seu funcionamento. Podendo ser utilizado tanto arrefecimento a ar como líquido em ambas as situações. O arrefecimento é essencial para evitar incêndios, especialmente em sistemas que geram calor excessivo, como motores e baterias.

A Figura 5 mostra um sistema de arrefecimento líquido para um motor, conforme Incropera *et al.* (2008), o fluído de arrefecimento que fica depositado em um reservatório, até ser succionado por uma bomba para trocar calor com o motor e depois é direccionado a um trocador de calor do tipo radiador para ser resfriado trocando calor com o ar do ambiente.

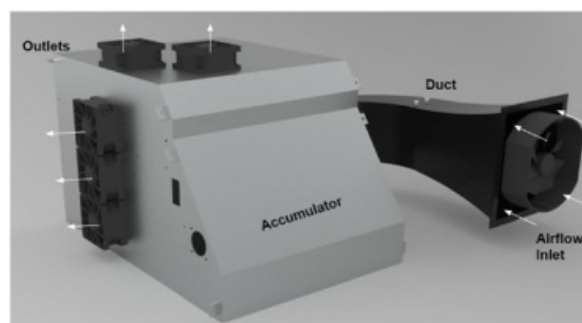
Figura 5 – Arrefecimento motor



Fonte: (SILVA, 2024), Adaptado.

No arrefecimento a ar, o calor gerado é transferido diretamente para o ambiente circundante por meio de superfícies expandidas, como aletas, utilizando a convecção natural ou forçada para dissipar o calor de maneira eficaz (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Na Figura 6 um exemplo de arrefecimento a ar em um acumulador.

Figura 6 – Arrefecimento a ar em acumulador



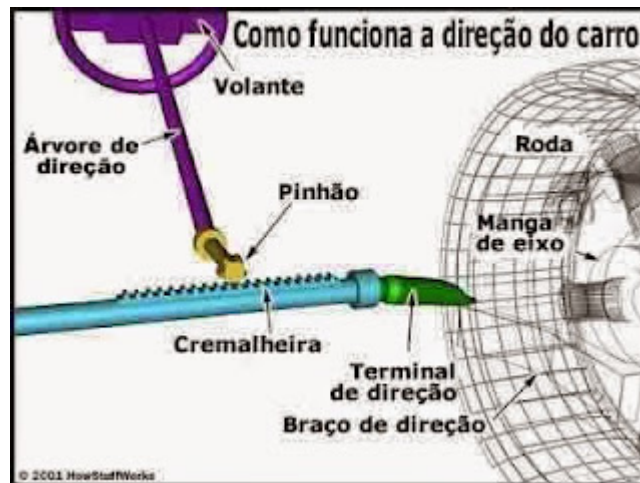
Fonte: (JAMDAR, 2023)

2.2.5 Direção

A funcionalidade da direção é explicada por GILLESPIE (1992, p. 275) "A função do sistema de direção é direccionar as rodas dianteiras em resposta às entradas de

comando do motorista para fornecer controle direcional geral do veículo". Entre os diversos tipos de sistemas de direção o utilizado é o de pinhão e cremalheira. O sistema de direção trabalha de acordo com o *input* do piloto pelo volante dando um comando às rodas dianteiras para que elas exerterçarem, um sistema de direção pinhão cremalheira é exposto na Figura 7.

Figura 7 – Sistema de direção



Fonte: (CARROS, 2015).

2.2.6 Powertrain mecânico

A área de *powertrain* mecânico ou transmissão é responsável pela transmissão dos movimentos gerados pelo motor até a roda. Conforme explica Corlla (2012, p. 227) "A função da transmissão do veículo é transferir a potência do motor para as rodas motrizes do veículo". Para a Fórmula SAE existem dois principais tipos de transmissão que são o trem de engrenagens e a transmissão por correias ou combinações dos dois. Uma transmissão por trem de engrenagens usa uma série de engrenagens para transferir energia e ajustar velocidade e torque. Engrenagens grandes transferem mais torque com menos velocidade, enquanto as pequenas fazem o oposto. É uma maneira eficiente de transmitir energia em máquinas. Já a transmissão por corrente é comumente encontrado em bicicletas e motocicletas. A energia é transferida através da corrente que se move sobre as rodas dentadas, proporcionando diferentes relações de velocidade e torque.

2.2.7 Powertrain elétrico

O powertrain elétrico é responsável por garantir a operação estável e correta dos motores e inversores. Tendo diferentes tipos e classificações de inversores, de forma geral o inversor será responsável por transferir a energia do acumulador e transformar para o tipo, seja corrente contínua ou alternada, que a entrada do motor precisa. Os inversores em sua maioria também atuam como controladores de velocidade do motor,

realizando esse controle a partir da forma e da amplitude das tensões e correntes transportadas para o motor.

2.2.8 Aquisição de dados

O sensoriamento do carro para utilização em tempo real e também para estudos posteriores é função do projeto de aquisição de dados, muitos desses dados são vitais para garantir o bom funcionamento do protótipo, por exemplo: Tensão da bateria, temperatura de determinados componentes, velocidade do carro e etc. Tais procedimentos ocorrem através da utilização de sensores específicos para cada aplicação, que captam os parâmetros e enviam para um módulo de aquisição. Os módulos de aquisição de dados são uma forma de se organizar o sistema eletrônico do veículo permitindo uma compreensão melhor de toda a sua extensão.

2.2.9 Circuitos de segurança

Os circuitos ou circuitos de segurança são projetados para garantir a segurança dos pilotos e dos carros em si, através de diversos sensores distribuídos pelo carro. Ao total são 8 principais circuitos no carro, sendo eles: *Battery Management System* (BMS), *Brake System Plausibility Device* (BSPD), IMD, Botões e Chaves, *Fault Latching*, *Tractive System Active Light* (TSAL), *Ready to drive sound* (RTDS) e Luz de freio.

2.2.10 Acumulador

O principal sistema de estudo deste trabalho e um dos componentes mais importantes de um carro elétrico, é a junção de diversas células de bateria que formam a fonte de energia para o motor ou motores utilizados. O acumulador é um pacote de bateria de íons de lítio feito sob medida que inclui tudo o que é necessário para uma operação segura e para fornecer energia aos controladores do motor (MUNIR, 2027).

Os bancos de baterias são montados conectando em série e em paralelo as células de bateria para atingir tensão e corrente desejados. Conexões paralelas garantem os mais altos requisitos de capacidade e corrente, enquanto conexões em série são usadas para aumentar a potência fornecida Zwicker *et al.* (2020).

Além das baterias, existe uma estrutura que armazena e protege as células, chamada de contêiner, geralmente é localizado na parte traseira do veículo. Seu tamanho e a sua configuração variam de acordo com o modelo e as necessidades da equipe, bem como a sua capacidade energética. Sendo o BMS o mais importante para esse projeto por ser alocado dentro do acumulador.

Figura 8 – Acumulador



Fonte: Collins (2015)

2.2.10.1 Células de bateria

Baterias de Lítio são as mais utilizadas entre as equipes de fórmula SAE e companhias automotivas, além disso são amplamente utilizadas em dispositivos eletrônicos portáteis como notebooks, devido à sua alta densidade de energia, eficiência de recarga e ciclo de vida longo, permitindo maior autonomia e desempenho em veículos elétricos de alta performance (ARMAND, 2001).

Essas células se dividem em três tipos principais, que são as células *pouch*, cilíndricas e prismáticas, sendo as células prismáticas dificilmente usadas por terem uma elevada massa, para os outros dois modelos suas principais diferenças são o formato e a forma de conexão. Onde as células *pouch* têm um invólucro de leve flexibilidade e dois conectores flexíveis para as conexões positiva e negativa, um exemplo de célula *pouch* é exemplificado na Figura 9.

Figura 9 – Célula *Pouch*



Fonte: (EVLITHIUM, 2023)

Por outro lado, as cilíndricas apresentam um formato completamente rígido, onde suas extremidades superior e inferior são seus polos positivo e negativo, um exemplo de célula cilíndrica é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Célula Cilíndrica

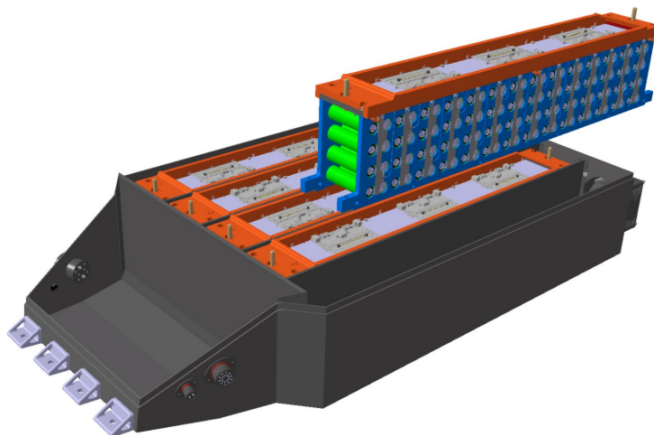


Fonte: (MARSEN, 2023).

2.2.10.2 Contêiner e regras

O contêiner é responsável por armazenar e proteger as células de bateria. Dentro do contêiner as células são divididas em seguimentos. Os seguimentos são divisões físicas dentro do acumulador onde um número de células é colocado em cada seguimento.

Figura 11 – Contêiner com 5 seguimentos

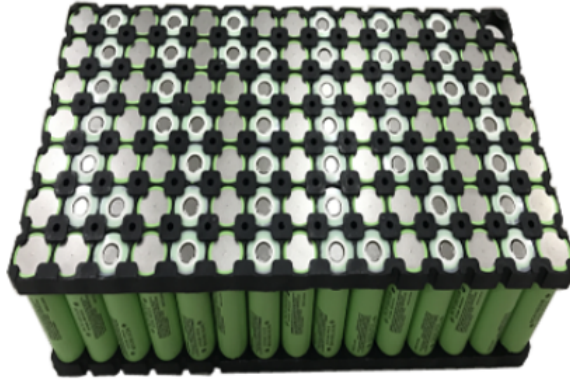


Fonte: Leotta (2020)

Além disso o contêiner completo deve conter: estrutura externa, estruturas internas divididas, estrutura superior removível, furos e/ou aberturas e fixadores externos.

O acumulador deve atender aos seguintes itens do regulamento da SAE (2023) *EV.5.1.2* que define que cada segmento do acumulador deve conter uma tensão estática máxima de menos de 120 V e energia máxima de 6 MJ, *F.10.3.2.* que fixa um máximo de 12 kg é permitido em qualquer segmento, *F.10.2* determina a espessura de cada chapa

Figura 12 – Exemplo conjunto de células



Fonte: ayaatech (2017)

do contêiner de acordo com seu material e posição e *F.10.5.7* que determina o número de fixações do acumulador ao chassi de acordo com seu peso, tendo um máximo de 10 fixadores. Para a estrutura que irá, acomodar as células de cada segmento, como no exemplo da Figura 12. Estrutura essa que deve ser onstituída de material isolante e não inflamável.

2.3 DIMENSIONAMENTO DA QUANTIDADE DE CÉLULAS

Para se determinar o número adequado de células de bateria para atender aos requisitos de tensão, capacidade e potência do veículo. São inicialmente utilizadas as equações 2.1 e 2.2 para definir a quantidade de células em série e paralelo respectivamente, onde V_{conv} respesente a tensão nominal do motor, V_{bat} a tensão da célula de bateria, N_s o número de células em série necessário, $ENERGIA$ a energia total que o carro precisa e Ca_h a capacidade da bateria em Ah, conforme (CALLIGARIS, 2021) e (TRUDES, 2019).

$$N_s = \frac{V_{conv}}{V_{bat}} \quad (2.1)$$

$$N_p = \frac{\frac{ENERGIA}{V_{conv}}}{Ca_h} \quad (2.2)$$

Caso a potência fornecida pelo veículo seja insuficiente para atender a corrente exigida pelo motor, o recálculo do número de células em paralelo é necessário, dividindo da corrente nominal do motor I_{conv} pela corrente nominal de descarga da célula I_{bat} , equação 2.3. Isto permite determinar o número de células necessárias em paralelo para fornecer essa corrente, conforme (CALLIGARIS, 2021).

$$N_p = \frac{I_{conv}}{I_{bat}} \quad (2.3)$$

Posteriormente, pode-se calcular a energia total da configuração obtida, pela equação 2.4. Onde E_t represente a energia total do conjunto de células, A_c corrente da célula em Ampere e V_{cel} a tensão da célula de bateria em Volts.

$$E_t = N_p * N_s * A_c * V_{cel} \quad (2.4)$$

Dessa forma, o total de células é representado na equação 2.5, com N_t representando o número totalde células.

$$N_t = N_s * N_p \quad (2.5)$$

3 METODOLOGIA

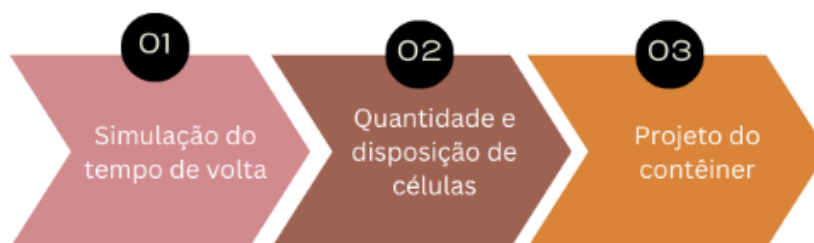
Este trabalho é classificado como uma pesquisa aplicada, por ter como objetivo principal propor uma solução para um problema específico, o desenvolvimento de um projeto conceitual de acumulador para o carro da equipe Capibarib-E Racing. Tendo uma pesquisa quantitativa com método científico hipotético-dedutivo. Uma pesquisa bibliográfica detalhada é realizada, utilizando uma variedade de fontes, incluindo artigos acadêmicos e livros relacionados a projetos de baterias e acumuladores.

Ao longo de todo o processo são utilizados recursos de simulação, planilhas eletrônicas para matriz de decisão que permitem analisar e otimizar o projeto de acordo com o que se deseja e técnicas de modelagem. Esta abordagem visa garantir que o projeto final não apenas atenda aos requisitos de desempenho e segurança, mas também contribua para o sucesso da equipe nas competições.

3.1 Etapas do projeto

Um projeto conceitual é a primeira etapa de desenvolvimento de um produto, onde se definem as principais características, requisitos e diretrizes para o projeto final, para que assim, posteriormente, o produto seja fabricado e atenda às necessidades do usuário de maneira eficaz e eficiente, visando garantir que o conceito inicial seja viável em termos técnicos, financeiros e de tempo. Dessa forma, o objetivo geral de desenvolver um projeto conceitual de um acumulador se dividi em 3 etapas conforme ilustra o fluxograma de projeto, na Figura 13, com cada uma das etapas sendo responsável por atender a um ou dois objetivos específicos.

Figura 13 – Fluxograma de projeto



Fonte: Autor

A primeira etapa intitulada simulação do tempo de volta, busca obter a energia que o carro gastara ao percorrer uma volta do circuito utilizado nas competições, e estudar do número de voltas total necessários na competição. Além disso, nessa etapa são obtidos parâmetros importantes como velocidade máxima e tempo gasto

em uma volta. Na segunda etapa do projeto, é realizado o cálculo detalhado para determinar a quantidade mínima de células necessárias para gerar a corrente e a tensão adequadas para alimentar os motores. Além disso, é realizada a revisão da regra para alocar o número de células por seguimento, tanto em série quanto em paralelo, garantindo que cada segmento possua o número de células dentro do limite estabelecido. Essa revisão é importante para garantir que o sistema elétrico tenha o tamanho correto e atenda a todos os requisitos técnicos do projeto. Por fim, na etapa final do projeto, foi desenvolvido o design mecânico do contêiner, que utilizou modelagem 3D utilizando o software *solidworks*. A modelagem 3D é uma técnica utilizada para criar representações tridimensionais de objetos físicos por meio de softwares especializados, como o *solidworks*. Este software é amplamente usado na engenharia e no design de produtos devido à sua capacidade de criar modelos precisos e detalhados. No desenvolvimento de componentes, a modelagem 3D com *solidworks* é extremamente útil para a prototipagem rápida, pois permite criar protótipos digitais que podem ser facilmente modificados e testados. Esse processo permitiu a criação de um modelo tridimensional detalhado do contêiner, considerando todos os aspectos funcionais e estruturais necessários.

3.1.1 Simulação do tempo de volta

O primeiro passo para o projeto de um acumulador é saber a quantidade máxima de energia que o veículo vai necessitar para atender uma determinada demanda (por exemplo qual a quantidade de energia necessária para que um determinado modelo de carro percorra 500 Km, para este trabalho existe uma necessidade que o carro percorra 22 Km sem ser recarregado). No entanto, para se obter um dado tão específico, é necessário analisar um elevado número de parâmetros, cuja complexidade é elevada. Dessa forma, as simulações computacionais são uma forma de obter parâmetros de trabalho, dentre os vários tipos de simulação possíveis, um dos mais úteis para veículos de alto desempenho é a Simulação de Tempo de Volta ou LTS (*Lap Time Simulation*). Onde a partir de um modelo digital do carro e de diversas condições de contorno como circuito, densidade do ar e alguns outros coeficientes, são feitas iterações matemáticas que geram uma lista de resultados desejados. O principal desses para este estudo como citado anteriormente é a demanda energética total.

Para realizar a simulação de tempo de volta foi escolhido o software *Optimum Lap* o qual é um software que possibilita aos usuários realizar simulações de um veículo de forma gratuita. Dessa forma, construindo o modelo digital do veículo a partir de diversos dados como os descritos na Tabela 2, e alguns outros mais confidenciais como exemplo altura do centro de massa, valor da redução fixa, eficiência de transmissão entre outros fatores, que são obtidos dos projetos de suspensão, chassi, *powertrain* e

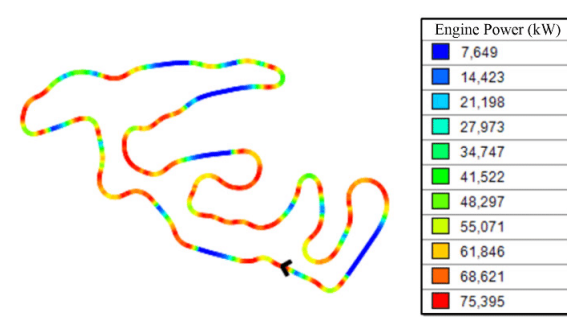
freios, além do gráfico de rotação x torque do motor disponibilizado pelo fabricante. E também tendo como base trajeto utilizado na competição FSAE Brasil 2017. Pois, o comprimento total da pista e o número voltas do enduro são padronizados, mudando apenas o seu layout.

Tabela 2 – Dados de entrada para simulação

DADO	ESPECIFICAÇÕES
Massa total	250 Kg
Área frontal	0,8 m ²
Densidade do ar	1,225 Kg/m ³
Raio do pneu	0,288 m
Resistência a rolagem	0,02
Densidade do ar	1,225 Kg/m ³

Fonte: Autor

Figura 14 – Exemplo de simulação via *Optimum Lap*



Fonte: (BHAGUBAI, 2020)

3.1.2 Escolha e alocação das células

É realizada uma pesquisa de mercado para coleta de possíveis células para serem utilizadas além de seus custos e especificações por meio do datasheet de cada uma delas. Ao total foram consideradas 10 células de 6 fabricantes diferentes, tanto células *pouch* quanto cilíndricas. Dessa forma, foi construída uma planilha eletrônica via google planilhas para realizar cálculo da energia armazenada e do número total de células necessário para cada modelo, através das equações 2.1 a 2.5, obedecendo às condições de operação impostas pelo fabricante dos motores, que são a corrente mínima de 65 A cada e tensão mínima de 120 V geral mas para o projeto são utilizados o valores máximos de 320 V de tensão e 90 A de corrente, para extrair a máxima potência dos motores. Além disso, a planilha foi utilizada como matriz de decisão, para escolha da célula definitiva, utilizando como parâmetros preço, peso, número total de células e facilidade na montagem no contêiner.

Ademais, na mesma planilha foi calculado a distribuição das células em série, paralelo e por seguimento. Obedecendo o item ao item *EV.5.1.2* do regulamento SAE

(2023). No qual, é especificado 6 MJ de energia máxima e 120 V de tensão máxima para cada segmento. Além disso, cada segmento deve possuir no máximo 12 kg totais segundo o item F.10.3.2. Para a seleção da células são seguidos os seguintes critérios peso total deve ser inferior a 40 Kg, preço deve ser inferior a R\$ 35.000,00 e menos de 500 células totais.

3.1.3 Modelagem da estrutura

Para a modelagem do contêiner, o projeto utiliza uma abordagem cuidadosa e detalhada no design dos componentes. O primeiro passo foi verificar detalhadamente todas as funções necessárias para o contêiner. Onde as funções requisitadas são: armazenamento dos componentes, organização das células, isolamento elétrico, conexões elétricas e periféricos de ventilação e controladores elétricos. Esse processo de identificação foi fundamental, pois garantiu que nenhum componente essencial fosse negligenciado. Todos o componentes foram alocados em 5 categorias, onde cada categoria tem um número de peças específico, conforme Tabela 3 exibe cada categoria e o número de componentes da categoria.

Tabela 3 – Componentes do acumulador

CATEGORIA	Nº DE PEÇAS
Estrutura principal	3
Moldes de acomodação da célula no seguimento	4
Conexões	3
Isolamentos do seguimento	2
Periféricos do seguimento	2

Fonte: Autor.

Neste projeto, o *solidworks* é utilizado para modelar a estrutura que acomodará as células de bateria, criando o contêiner. Essa ferramenta permitiu desenvolver um design preciso e eficiente, garantindo que a estrutura atenda aos requisitos técnicos e de segurança necessários para a aplicação das baterias.

4 Resultados e discussões

Através das simulações realizadas foi possível estimar os dados colocados na Tabela 4, como citado anteriormente o principal valor desejado é a energia gasta para completar uma volta, onde foi obtido o valor de 499,48 KJ.

Tabela 4 – Resultados da simulação

VARIÁVEL	VALOR OBTIDO
Tempo de volta	76,6 s
Velocidade máxima	90,78 Km/h
Energia gasta	499,48 KJ

Fonte: Autor.

Além das variáveis apresentadas, diversas outras foram obtidas via simulação mas por não serem relevantes para o trabalho apresentado não serão avaliadas. Como o objetivo deste trabalho é dimensionar um acumulador que seja capaz de suportar uma prova de enduro completa sem ser recarregado, deve-se multiplicar o valor encontrado pela constante de 22, que é o número de voltas que deve ser realizada para completar um enduro. Dessa forma, se obtêm o valor de 11 MJ. Ademais, como coeficiente de segurança será usado o valor de 1,2 para a quantidade de energia necessária semelhante ao utilizado por TRUDES (2019). Obtendo assim 13,2 MJ de energia necessária, valor esse aceitável se comparado com TRUDES (2019) que obteve 18,3 MJ ao simular um veículo de 300 Kg.

4.1 Escolha de célula e alocação

A partir das 10 células selecionadas de variadas marcas é montada uma planilha com todas as principais variáveis coletadas nos seus respectivos manuais ou *datasheet*. Assim, podendo avaliar as diversas características dentre elas, peso, volume, preço, energia fornecida, tensão fornecida, facilidade na montagem. São mostradas na Tabela 5 os 10 modelos e algumas dessas variáveis.

Tabela 5 – Células variáveis unitárias

Fabricante	Modelo	Tipo	Massa (g)	Tensão (V)	Capacidade (Ah)	Preço (R\$)
Dongguan fbtech	32700-6000mAh	cilíndrica	141	3,2	6	173,34
Globalbat	GSNCM46160M-31	cilíndrica	680	3,7	31	380,75
Melasta	MB-ICR18650	cilíndrica	48	3,6	2	75,5
Melasta	SLPB9264159	<i>pouch</i>	192	3,7	10	33,2
Melasta	SLPB9364159HV	<i>pouch</i>	207	3,8	11,3	99,28
A123	ANR26650	cilíndrica	76	3,3	2,5	65,28
A123	FC46120P	cilíndrica	453	3,2	25	267,61
A123	INR18650	cilíndrica	39,5	3,2	3,2	72,31
LG	LGBBMH11865	cilíndrica	49	3,7	3,2	28,9
Samsung	ICR18650-22E	cilíndrica	50	3,7	2,2	35,55

Fonte: Autor.

Foram realizados cálculos para todos os 10 modelos de células de bateria, nos quais o número total de células, o preço total e o peso de todos os modelos foram determinados. Essas especificações foram calculadas com base nas especificações dadas em cada modelo conforme Tabela 5 e a capacidade energética necessária para o sistema. O número total de células foi calculado por tensão e capacidade, o preço total é calculado por preço unitário e o peso total é calculado conforme a soma do peso individual de cada célula por quantidade total de células em todo o sistema. Os resultados foram colocados na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações calculadas

MODELO	PESO TOTAL (Kg)	Nº TOTAL DE CÉLULAS	PREÇO (R\$)
32700-6000mAh	211,5	1500	260.010,00
GSNCM46160M-31	177,48	261	99.375,75
MB-ICR18650	25,632	534	40.370,00
SLPB9264159	33,408	174	5.776,8
SLPB9364159HV	17,595	85	8.438,8
ANR26650	36,86	485	31.660,8
FC46120P	90,6	200	53.522,00
INR18650	35,55	900	65.079,00
LGBBMH11865	38,367	783	22.628,7
ICR18650-22E	39,15	783	27.835,65

Fonte: Autor.

Após analisar todas as células foram eliminadas todas que apresentaram um peso total superior a 40 Kg, preço superior a R\$ 35.000,00 e mais de 500 células totais. Restando apenas 3 modelos: SLPB9264159, SLPB9364159HV e ANR26650. Foi escolhida a célula A123 modelo ANR26650, pois as outras duas opções encontradas são células do tipo *pouch* que apresentam um menor rigidez estrutural, maior dificuldade de manuseio, terem um durabilidade muito inferior e maior necessidade de controle

térmico. Na Tabela 7 são demonstradas as características da célula escolhida.

Tabela 7 – Célula escolhida

VARIÁVEL	VALOR
MODELO	ANR26650
TIPO	Cilíndrica
DIÂMETRO (mm)	26
COMPRIMENTO (mm)	65
MASSA (g)	76
PREÇO UNI. (reais)	65,28
Tensão nominal (V)	3,3
Energia (Wh)	18,25
Capacidade (mAh)	2500
Corrente de descarga (A)	50
Nº TOTAL DE CÉLULAS	485

Após a escolha da célula deve-se realizar o dimensionamento do número de células pelos criterios de 120 V de tensão máxima, 6 MJ máximos e 12 Kg máximos por seguimento. Sendo assim, o valor máximo de células em série calculado pela regra da tensão máxima é de 36 células em série, desconsiderando as células em paralelo. Ademais, para a regra da energia máxima de 6 MJ, tem-se um valor de 202 células como limite por segmento. Por fim, para a regra do peso máximo, tem-se um valor de 157 células por segmento.

Depois de calculado o número de células em paralelo pelas equações 2.2 e 2.3, tem-se o valor de 5 e para se manter um valor seguro abaixo dos limite máximos foi estipulado um valor de 14 células em série, totalizando 70 células por seguimento e um total de 7 seguimentos, resultando em um número total de 490 células, sendo suficiente para as condições desejadas.

4.2 Estrutura modelada

Todos componentes citados na Tabela 3, foram modelados através do *solidworks* e as espessuras mínimas utilizadas foram superiores as pedidas na regra da Fórmula SAE, mostradas na tabela 3.

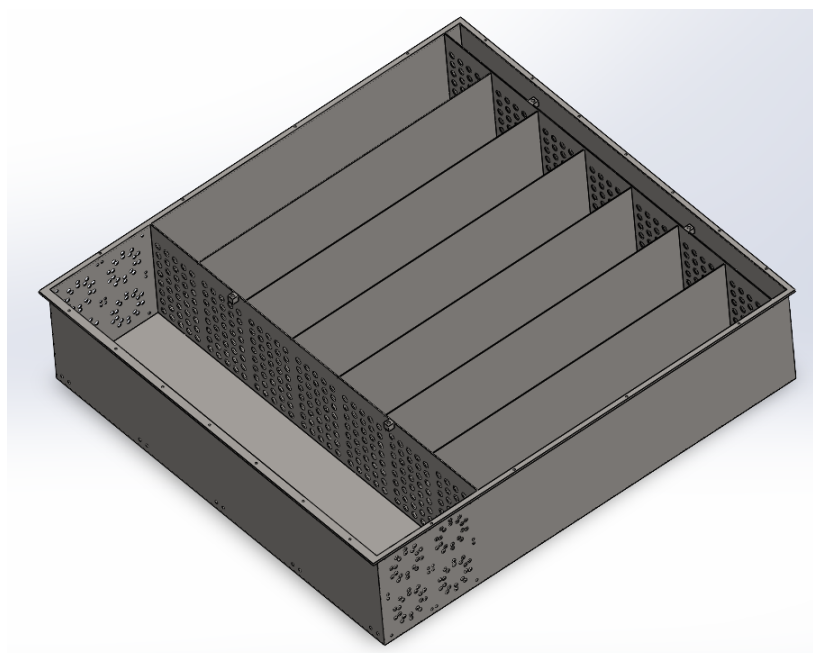
4.2.1 Estrutura principal

Para a estrutura principal que é dividida em corpo, tampa e fixadores no chassi todos projetados em material aço AISI 1020. Onde o corpo funciona analogamente a um esqueleto, pois é onde todos os outros componentes serão fixados, modelo 3D do corpo é mostrado na Figura 15.

Tabela 8 – Componentes do acumulador

COMPONENTE	ESPECIFICAÇÕES
Estrutura externa	Piso em aço com 1,25mm ou mais
Estrutura externa	Paredes com no mínimo 0,9 mm em aço
Estruturas internas	Paredes com no mínimo 0,9 mm em aço
Estrutura superior	Cobertura com no mínimo 0,9 mm em aço
Estrutura superior	No mínimo um fixador em cada canto.
Furos e aberturas	Furos com 10 mm máximos de diâmetro.
Furos e aberturas	Máximo de 25% das áreas das paredes podem ser furadas
Furos e aberturas	Furos não podem ser na direção do piloto
Fixadores externos	O contêiner deve ser fixado na estrutura do Chassi
Fixadores externos	Fixações do contêiner deve ser de aço com espessura mín. de 2 mm
Fixadores externos	São necessários 8 ou mais fixadores

Figura 15 – Corpo da estrutura principal

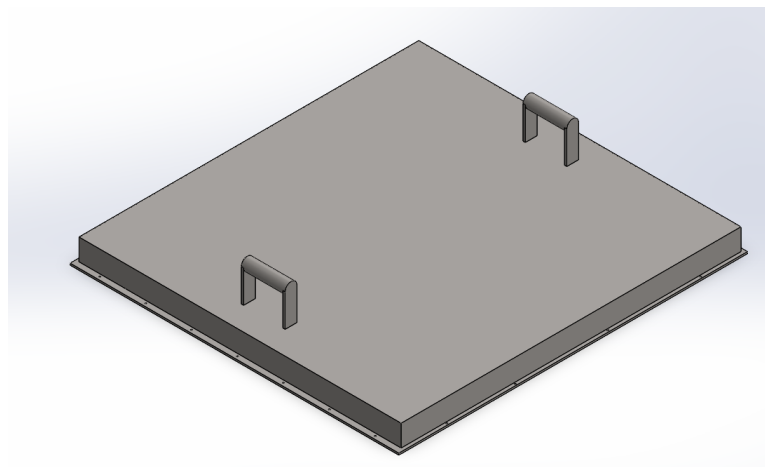


Fonte: Autor.

A tampa possui fixadores para ser conectada no corpo. Além disso, possui função de proteger a parte superior o contêiner e também possui duas alças para auxiliar no transporte do acumulador, conforme Figura 16.

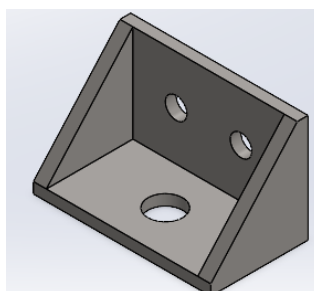
Os fixadores, possuem apenas a função de conectar a estrutura do acumulador ao chassi, sendo esse um item obrigatório no projeto ao total são usado 10 fixadores iguais ao da Figura 17.

Figura 16 – Tampa



Fonte: Autor.

Figura 17 – Fixadores no chassi

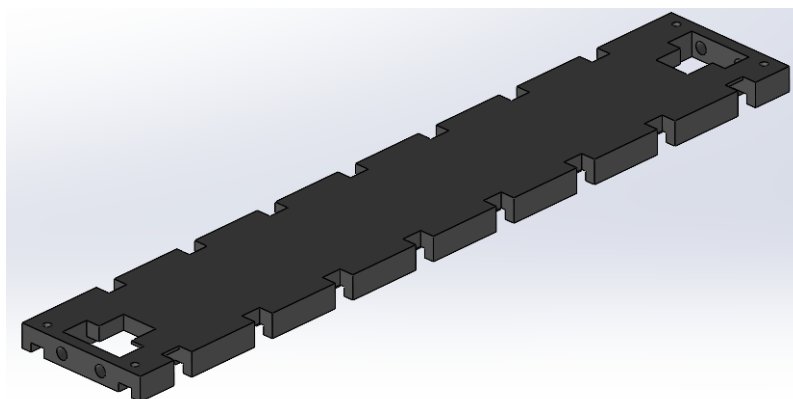


Fonte: Autor.

4.2.2 Moldes de acomodação das células no seguimento

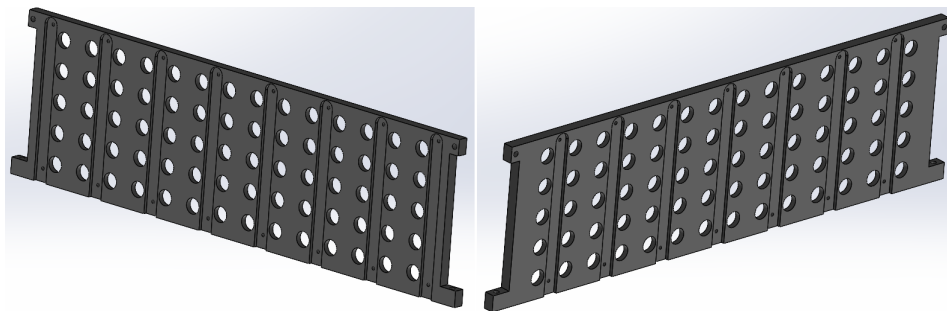
Os moldes de acomodação das células no segmento da bateria são projetados de forma a garantir a segurança e estabilidade estrutural. Para isso, eles são divididos em quatro componentes principais: o molde superior, o molde esquerdo, o molde direito e o molde inferior, mostrados nas Figuras 18 a 20.

Figura 18 – Molde superior



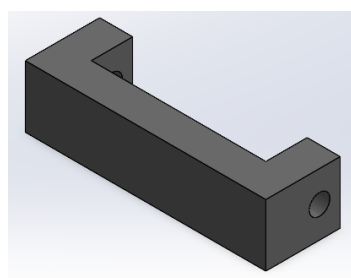
Fonte: Autor.

Figura 19 – Moldes esquerdo e direito



Fonte: Autor.

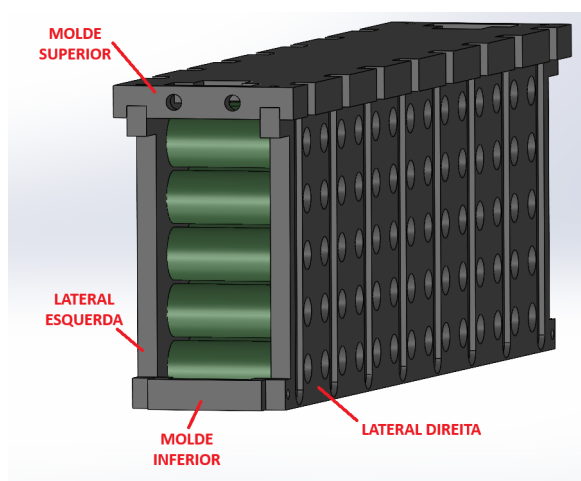
Figura 20 – Molde inferior



Fonte: Autor.

O molde superior serve para alinhar os 2 moldes laterais e fixar a estrutura no corpo do contêiner. Os moldes esquerdo e direito oferecem suporte lateral, alinhando e segurando as células, além de servir de local para fixar as conexões elétricas com as células. Já o molde inferior é responsável por manter as laterais alinhadas. Para o material foi aplicado no *solidworks* plástico PA tipo 6 que possui uma densidade de 1,12 g/ml similar ao PET-G que deve ser utilizado por garantir os requisitos definidos no regulamento. A densidade do PET está entre 1,37 e 1,45 g/ml (PREVITALE, 2022). Na Figura 21 é mostrada configuração dos moldes com as células.

Figura 21 – Montagem dos moldes

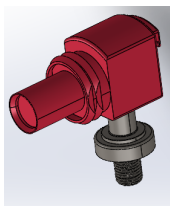


Fonte: Autor.

4.2.3 Conexões

As conexões são divididas em 3 componentes: *Maintenance plug*, *busbar* intermediário e *busbar* das pontas. O *maintenance plug* é uma peça comprada pronta direto para o uso, o modelo utilizado foi obtido no site grabcad (MUKTI, 2022), sua função é realizar a ligação elétrica entre dois seguimentos.

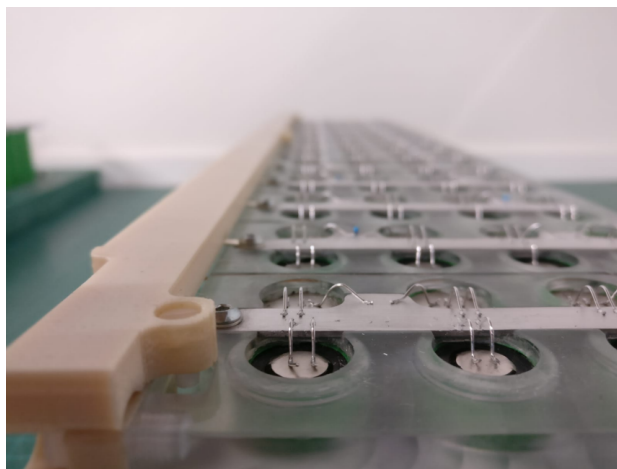
Figura 22 – *maintenance plug*



Fonte: (MUKTI, 2022)

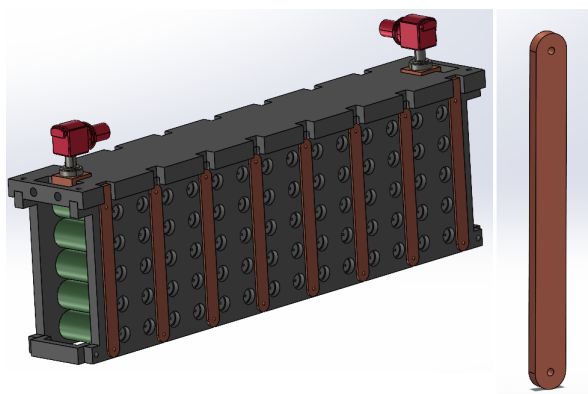
O *busbar* intermediário fez a ligação em série das células por meio de solda ponto, analogamente ao da Figura 23.

Figura 23 – Solda ponto entra células e *busbar*



Fonte: (LEOTTA, 2020)

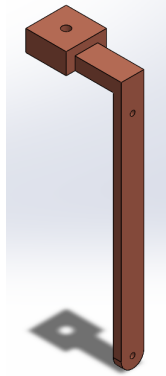
Figura 24 – *Busbar* intermediário na montagem e isolado



Fonte: Autor.

O busbar das pontas é utilizado para conexão da primeira ou ultima fileira de células de cada seguimento com o maintenance plug.

Figura 25 – Busbar das pontas

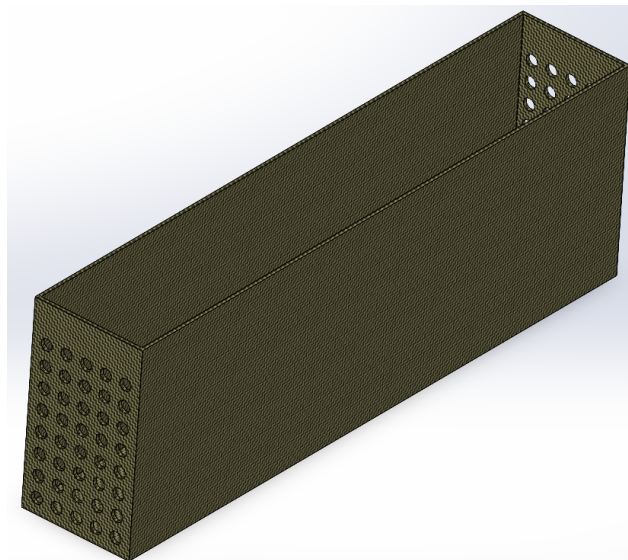


Fonte: Autor.

4.2.4 Isolamentos do seguimento

Os isolamentos do seguimento tem a função de isolar eletricamente cada seguimento evitando falhas do sistema elétrico. Esse sistema é dividido em caixa do stack e chapa superior dos stacks. Onde na caixa do stack é colocado todo o sistema de moldes de acomodação das células, feitos em fibra de carbono.

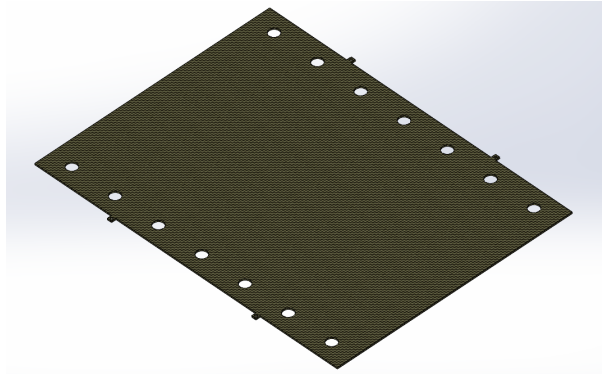
Figura 26 – Caixa do stack



Fonte: Autor.

A chapa superior dos stacks é utilizada no final da montagem isolamento a parte superior dos seguimentos.

Figura 27 – Chapa superior dos stacks



Fonte: Autor.

4.2.5 Periféricos do seguimento

Os sistemas periféricos presentes no acumulador são: arrefecimento e BMS. Onde o arrefecimento é responsável pelo controle da temperatura das baterias, para isso foram colocados coolers para entrada e saída de ar. Ao total foram colocados 15 coolers, idênticos ao do Figura 28, o modelo utilizado foi obtido no site grabcad (MAHMOUD, 2024).

Figura 28 – Cooler



Fonte: (MAHMOUD, 2024)

O sistema de BMS é o principal controlador eletrônico das células. Além da central mostrada na Figura 29 são utilizadas diversas placas em cada seguimento, para este projeto não definido nenhum modelo específico de BMS. Por conta disso, foram deixados espaços vazios para alocação desse sistema.

Figura 29 – BMS central



Fonte: (HEIDENREICH, 2024)

4.2.6 Massa do acumulador

Após a modelagem de todos os componentes e definição de seus materiais foi possível obter a massa de todos os componentes, conforme Tabela 9 mostra cada componente e sua massa. Obtendo um peso total de 86,37 Kg que, em comparação com (TRUDES, 2019) que estabeleceu um limite máximo de 80 kg, o projeto apresentado está apenas 8% acima desse limite, mas mesmo assim se mantendo uma massa aceitável.

Tabela 9 – Massa dos componentes do acumulador

COMPONENTE	MASSA
Corpo	16,71 Kg
Tampa	7,66 Kg
Fixadores	45 g
Molde superior	0,56 Kg
Molde esquerdo	0,48 Kg
Molde direito	0,49 Kg
Molde inferior	10 g
Busbar intermediário	87 g
Busbar das pontas	189 g
Caixa do stack	1,43 Kg
Chapa superior dos stacks	2,02 Kg
Cooler	52 g

5 Conclusões

Inicialmente, foram definidos os objetivos de desenvolver um projeto conceitual de um acumulador, realizar estudo para identificar número de voltas que o veículo deve realizar, utilizar simulação computacional para quantificar a energia gasta pelo carro, estudar a disposição das células nos segmentos do acumulador e realizar o desenvolvimento do projeto conceitual do contêiner.

Após isso, foram identificados os parâmetros iniciais para simulação via Optimum Lap, dessa forma obtendo a energia necessária para a realização de 22 voltas completas no circuito, conforme a prova do enduro, foi possível obter o valor de 13,2 MJ para a energia necessária para a realização do enduro sem a necessidade de recarregamento da bateria, o que representa uma vantagem estratégica importante para o desempenho do protótipo. Na segunda etapa foram selecionadas dez modelos de células de bateria que poderiam ser utilizadas e foi calculada a quantidade de células que seriam necessárias de cada modelo. Dessa forma foi escolhida a célula A123 modelo ANR26650, caracterizada por uma das mais altas densidades energéticas, durabilidade e preço total de R\$ 31.660, e uma distribuição de 5 células em paralelo, 14 células em série, totalizando 70 células por seguimento e um total de 7 seguimentos, uma vez que esses parâmetros são principalmente importantes para a concorrência na Fórmula SAE. Por fim, foi realizado o projeto mecânico do acumulador que atende a todas as medidas elegidas da Fórmula SAE tendo 14 peças diferentes e com um design suficiente para a acomodação de todas as baterias. Após a conclusão de todas as etapas definidas na metodologia deste trabalho, foi possível alcançar resultados significativos que atendem plenamente os objetivos propostos.

O resultado alcançado se mostrou uma proposta viável para aplicação prática, por apresentar um custo reduzido de células. Além disso, a metodologia estruturada neste trabalho pode ser utilizada para desenvolvimento de novos projetos de acumulador. Conclui-se que o trabalho não apenas alcançou o desenvolvimento do projeto conceitual do acumulador, mas também uma metodologia com a utilização de diversas ferramentas para se construir novos modelos.

Durante a execução do projeto, algumas limitações significativas foram identificadas, sendo a principal delas a alocação de espaços vazios para disposição dos componentes e circuitos elétricos. A segunda limitação encontrada foi a necessidade de arrefecimento das células de bateria, pois o arrefecimento em sistemas de baterias de íon-lítio é fundamental para garantir a segurança, eficiência e longevidade do sistema. Por conta

disso, foram colocados coolers para entrada e saída de ar, além de furos para passagem do fluxo de arrefecimento.

Como sugestões para futuros trabalhos, é essencial implementar ações para a resolução definitiva das duas grandes limitações encontradas. Dessa forma, deve-se desenvolver os circuitos elétricos que necessariamente são alocados dentro do contêiner do acumulador. Ademais, é igualmente necessário realizar simulações computacionais do sistema de arrefecimento para garantir que as células tenham sua temperatura controlada durante todo o seu funcionamento.

Referências Bibliográficas

- ARMAND, J.-M. T. M. *Issues and Challenges Facing Rechargeable Lithium Batteries*. 1. ed. [S.l.]: Nature Publishing Group, 2001.
- AYAATECH. *13S8P 48V 27.2Ah Li-ion battery pack*. 2017. Disponível em:<<https://www.ayaatech.com/customized-lithium-ion-battery-pack/48v-13s-55-5v-15s/141.html>> Acessado: 2023-24-02.
- BHAGUBAI, P. P. C. Design, multi-objective optimization, and prototyping of a 20 kw 8000 rpm permanent magnet synchronous motor for a competition electric vehicle. *Energies*, v. 13, 2020.
- CALLIGARIS, F. C. J. L. B. Introdução ao dimensionamento de um banco de baterias para um veículo fórmula sae elétrico. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, p. 31945–31953, 2021.
- CARROS blogspot: falando sobre. *Direção do tipo pinhão e cramelheira: ela está se tornado quase universal e as assitências*. 2015. Disponível em: <<https://falando-sobre-carros.blogspot.com/2015/05/direcao-do-tipo-pinhao-e-cramelheira.html>> Acessado: 2023-24-02.
- CASTILLO, S. Advances in the recovering of spent lithium battery compounds. *Journal of Power Sources*, v. 112, n. 1, p. 247–254, 2002.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. *Transferência de calor e massa: uma abordagem prática*. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- COLLINS, S. *Delft DUT15*. 2015. Disponível em:<<https://www.racecar-engineering.com/cars/delft-university-of-technology/>> Acessado: 2024-07-09.
- CORLLA, B. M. D. *VEHICLE POWERTRAIN SYSTEMS*. [S.l.]: A John Wiley sons Ltd., 2012, p. 227.
- ELÉTRICOS, A. B. de V. *Carros elétricos: passado, presente e futuro*. 2023. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/>> Acessado: 2023-03-12.
- EVLITHIUM. *3.65V 32Ah High Energy Density Lithium Pouch Cell*. 2023. Disponível em:<<https://www.evlithium.com/hot-lithium-battery/32ah-high-energy-density-lithium-pouch-cell.html>> Acessado: 2023-24-02.
- GILLESPIE, T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. 1. ed. [S.l.]: Warrendale: SAE International, 1992, p. 275.
- HEIDENREICH walter. *BMS*. 2024. Disponível em:<<https://grabcad.com/library/bms-13>> Acessado: 2024-20-08.
- HYTECH, G. T. *Georgia Tech's Electric Race Car Team at the Formula SAE Competition*. 2024. Disponível em:<<https://masteranson.github.io/HyTech%20Racing/>> Acessado: 2024-07-09.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentos de transferência de calor e massa*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JAMDAR, S. Design and manufacturing of cooling system for fsae car. *Materials Today: Proceedings*, v. 77, p. 905–915, 2023.

LARMINIE, J. L. J. *Electric vehicle technology explained*. [S.l.]: Chichester: John Wiley e Sons, 2012.

LEOTTA, F. *Design of a Battery Pack for a Formula SAE Racing Car*. 2020. Disponível em:<<https://webthesis.biblio.polito.it/15660/1/tesi.pdf>> Acessado: 2023-24-02.

LIMPERT, R. *Brake Design and Safety* 3. ed. Warrendale, PA: SAE International., 2011, p. 1.

MAHMOUD, M. *8cm 12V Cooling Fan*. 2024. Disponível em:<<https://grabcad.com/library/8cm-12v-cooling-fan-1>> Acessado: 2024-20-08.

MARSEN. *A123 Systems ANR26650M1-B*. 2023. Disponível em:<<https://l1nq.com/nxfYi>> Acessado: 2023-24-02.

MOORHOUSE, J.; LAUFENBERG, K. *Electric vehicles: Powering the future. the Pembina Institute Backgrounder*, 2010.

MUKTI, F. H. P. *Battery Segment FSAE*. 2022. Disponível em:<<https://grabcad.com/library/battery-segment-fsae-1>> Acessado: 2024-20-08.

MUNIR, C. R. W. K. F. *MUR5: Accumulator Design for an FSAE Electric Car*. 2027. Disponível em: <<https://encr.pw/2B4N9>> Acessado: 2023-03-12.

PREVITALE, M. F. *Análise do processo de pós-condensação da resina de pet pós-consumo reciclada*. 2022. Disponível em: <<https://encr.pw/UrAKZ>> Acessado: 2023-03-12.

SAE, F. *Rules 2024*. 2023. Disponível em:<<https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>> Acessado: 2024-07-09.

SANTOS, J. d. S. Desafios e perspectivas para a adoção de veículos elétricos no brasil. *Revista de Tecnologia e Mobilidade*, v. 8, n. 2, p. 40–60, 2021.

SEWARD, D. *Race car design*. [S.l.]: PALGRAVE, 2014.

SILVA, D. *Características e funções do fluido de arrefecimento*. 2024. Disponível em:<<https://motulexpert.com.br/caracteristicas-e-funcoes-do-fluido-de-arrefecimento/>> Acessado: 2024-07-09.

TRUDES, P. E. S. M. G. P. *Dimensionamento e projeto de banco de baterias para um protótipo Fórmula SAE elétrico*. 2019. Disponível em:<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/23868/1/PG_DAELE_2019_2_19.pdf> Acessado: 2024-07-09.

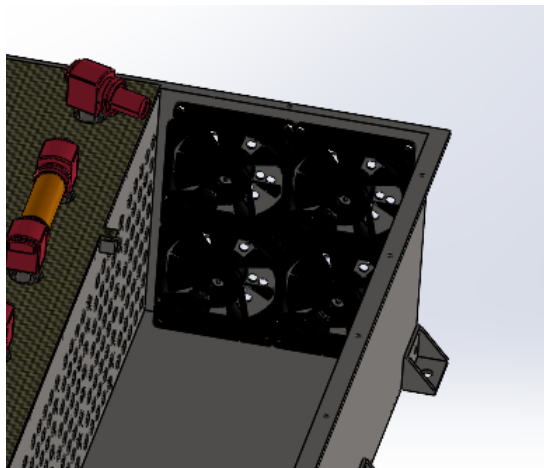
VENÂNCIO, N. *Projeto do chassi de uma viatura de fórmula, Dissertação do mestrado integrado em engenharia mecânica: Universidade do porto*. 2013. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/143396156.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2024.

WAGH, E. A. N. S. Y. Design and analytical calculations of double wishbone for formula student race car. *International Journal of Engineering Research e Technology*, v. 9, p. 225, 2020.

ZWICKER, M.; MOGHADAM, M.; ZHANG, W.; NIELSEN, C. Automotive battery pack manufacturing – a review of battery to tab joining. *Journal of Advanced Joining Processes*, v. 1, p. 100017, 2020. ISSN 2666-3309. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666330920300157>>.

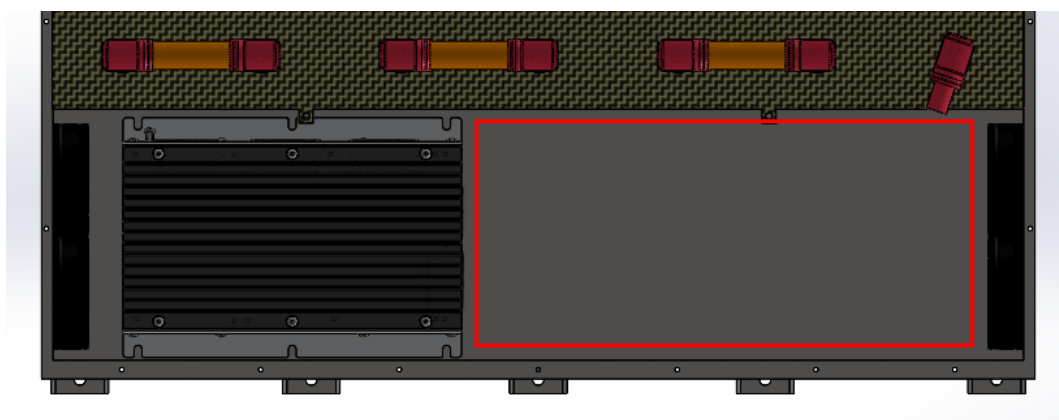
ANEXO A – Imagens da montagem do contêiner

Figura 30 – Coolers para entrada de ar



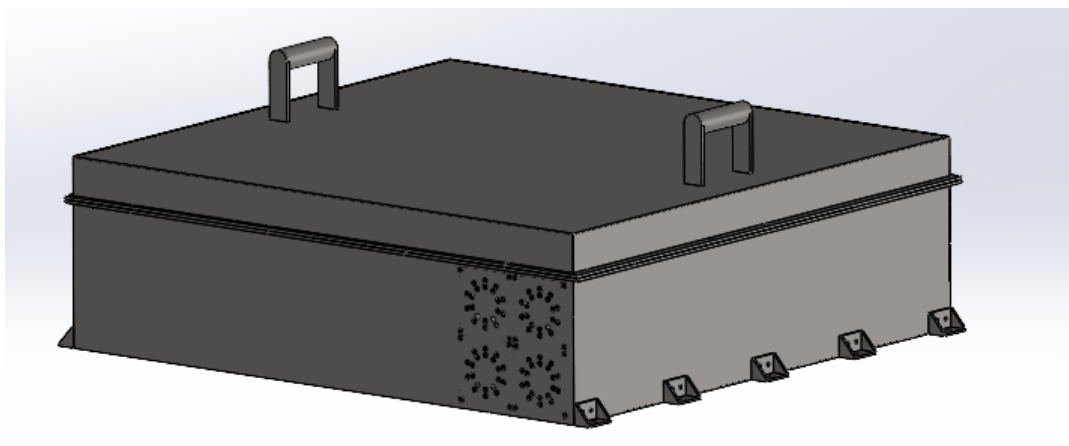
Fonte: Autor.

Figura 31 – Espaço reservado para circuitos do bms



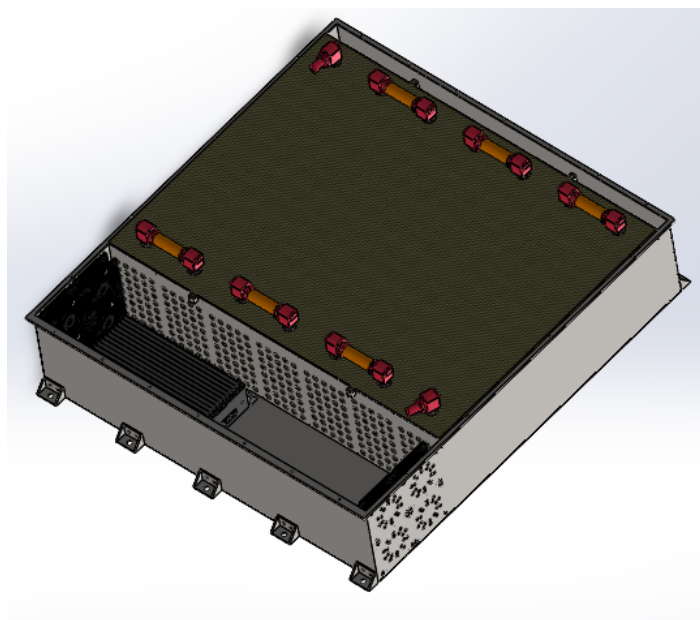
Fonte: Autor.

Figura 32 – Montagem completa



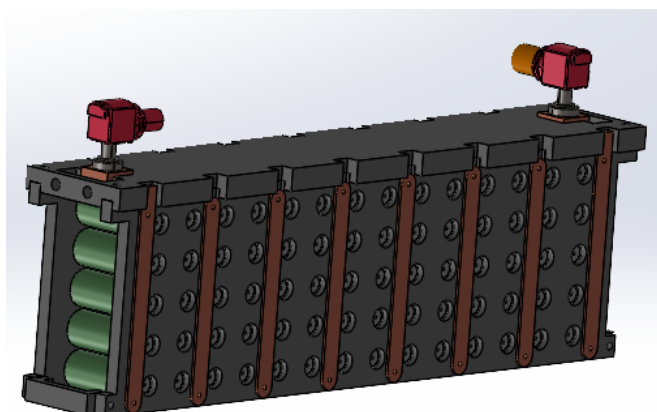
Fonte: Autor.

Figura 33 – Montagem completa sem tampa



Fonte: Autor.

Figura 34 – Seguimento montado com busbar



Fonte: Autor.