



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

RODRIGO INOCENCIO CANE

PROJETO INFORMACIONAL E CONCEITUAL PARA A ELETRIFICAÇÃO DE UM
PROTÓTIPO DE UM VEÍCULO DE PASSEIO

Joinville
2020

RODRIGO INOCENCIO CANE

PROJETO INFORMACIONAL E CONCEITUAL PARA A ELETRIFICAÇÃO DE UM
PROTÓTIPO DE UM VEÍCULO DE PASSEIO

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Modesto Hurtado Fehrer

Joinville
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cane, Rodrigo

PROJETO INFORMACIONAL E CONCEITUAL PARA A ELETRIFICAÇÃO
DE UM PROTÓTIPO DE UM VEÍCULO DE PASSEIO / Rodrigo Cane ;
orientador, Modesto Hurtado Ferrer, 2020.

58 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia Automotiva, Joinville, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Automotiva. 2. Carro elétrico. 3.
Bateria. 4. Gestão de projeto. 5. Formula SAE. I. Hurtado
Ferrer, Modesto . II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Automotiva. III. Título.

RODRIGO INOCENCIO CANE

PROJETO INFORMACIONAL E CONCEITUAL PARA A ELETRIFICAÇÃO DE UM
PROTÓTIPO DE UM VEÍCULO DE PASSEIO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 4 de dezembro de 2020.

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Eng. Modesto Hurtado Fehrer
Presidente

Profa. Dra. Janaina Renata Garcia
UFSC

Eng. Luiz Fernando Oliveira
Renault do Brasil

Eng. Marcio Pimenta
Renault do Brasil

Este trabalho é dedicado aos meus professores e mentores, à equipe Fórmula e tantos outros colegas, e principalmente aos meus queridos pais e irmã.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos aos meus amigos da faculdade que me acolheram no grande desafio que foi sair de casa para me provar. Em especial ao Lucas Souza, que não somente foi um exemplo para mim mas que me ajudou a conseguir meu primeiro emprego e ainda me acolheu literalmente na sua casa para que eu pudesse seguir no meu próximo grande desafio.

Agradecimentos aos meus colegas da equipe Fórmula. Todos os sacrifícios feitos compensaram mais que o prometido e quem dera pudesse voltar o tempo e fazer mais alguns. Em especial à equipe da elétrica que me permitiu liderá-los e aprender com vocês o quanto liderança significa se doar ao invés de tomar decisões pelos outros. E em caráter mais especial ainda ao Matheus Beuther. Nosso Timtim, que foi meu companheiro em toda minha jornada pela equipe e não me deixou sozinho nem quando eu pedi.

Agradecimentos aos meus professores e TAEs da UFSC pela devoção à universidade e ao ensino público de qualidade. Agradecimentos em especial à prof. Janaína Garcia, prof. Marcos Rabelo e prof. Sergio Idehara por terem seguido sua vocação e irem além das atividades obrigatórias de sala de aula, e ao prof. Modesto por muito mais do que eu poderia um dia agradecer.

Agradecimentos aos meus colegas da Renault, ao Giuliano Eichmann pelos aprendizados do estágio na CMO e ao Luiz Fernando Oliveira que me proporcionou a oportunidade de desenvolver este trabalho, por meio do qual realizo um sonho pessoal.

Agradecimentos aos meus amigos de Florianópolis: João Augusto Almeida Silva; Marco Daux; Edgard Kinchescki; Vitor Xavier; Daniel Vandri; entre tantos outros. É sortudo aquele que tenha um amigo para vida toda, imagino-me muito mais do que isso somente por tê-los conhecido.

Agradecimentos aos meus amigos que me acompanharam tantas vezes na viagem de Florianópolis à Joinville: Jorge Oliveira; Pedro Henrique Dellagiustina; Rafael Vandri; Gabriel Borges Marthendal. Compartilhamos muito das mesmas dificuldades de estar longe de nossas famílias e por isso temos uma compreensão um do outro muito mais forte hoje.

Agradecimentos aos meus colegas de apartamento: Matheus Mikley e Bruno Alberto Ligocki Pinto Weschenfelder. Fomos irmãos, às vezes pais e às vezes filhos uns dos outros, e sempre lembrarei com muito carinho dos anos e de todas as situações que passamos juntos. A maioria causada pelo Bruno.

Agradecimentos, por fim e com certeza o mais especial, à minha família, pai, mãe e mana. Tudo que sou e tudo que eu quero ser vem de vocês. E ao Billy, que passou as noites comigo enquanto eu escrevia e mudava de tema incontáveis vezes; lá estava ele deitado na cadeira ao meu lado.

*"Se um homem não sabe para qual porto ele navega,
nenhum vento é favorável..."*

(SENECA).

RESUMO

Hoje em dia é visível o interesse das grandes montadoras em entrar no mercado de veículos elétricos. Esta, porém, é uma tecnologia muito nova, considerados os grandes avanços recentes na área de baterias. Este projeto tem como foco unir os interesses da subsidiária nacional da montadora francesa Renault e a equipe Fórmula CEM. A montadora pretende nacionalizar um projeto de bateria para seus veículos que possa aumentar a sua competitividade no país. Já a equipe de competição busca um parceiro para o novo sistema de propulsão de modo a se aproximar das equipes de ponta no quesito performance. O objetivo é desenvolver um conceito de acumulador de baterias que possa ser utilizado para o dimensionamento das baterias dos protótipos da equipe e da montadora, usando o modelo PRODIP de gerenciamento de projeto. Na etapa informacional são definidas as necessidades e os requisitos necessários para o projeto. Na etapa conceitual são abordados os processos de decisão para as soluções seguindo uma lógica de dimensionamento. A ordem de definições se iniciou pela seleção da célula de bateria a ser utilizada no veículo. Então foram estudados os possíveis métodos de ligação elétrica e proteção de sobrecorrente. A partir da disposição do pack foi analisado o tipo construtivo do arrefecimento e a seleção de material do contêiner. O conceito selecionado consiste no uso de uma célula cilíndrica unida por solda a ponto a tiras de níqueis para proteção de sobrecorrente de balanceamento. Estas células serão arrefecidas por convecção forçada e será utilizado o aço SAE 4340 na configuração plana com nervuras para os suportes mecânicos do contêiner de paredes soldadas em aço SAE 1020.

Palavras-chave: Bateria. Protótipo. Veículo elétrico.

ABSTRACT

Nowadays the interest of the big automakers to enter the electric vehicle market is visible. This, however, is an all too new technology considering the recent great advances in the field of batteries. This project aims to unite the interests of the national subsidiary of the french automaker Renault and the Formula CEM team. The automaker intends to nationalize a battery project for its vehicles that can increase its competitiveness in Latin American market. The competition team, on the other hand, is looking for a partner for the new propulsion system in order to approach the top teams in terms of performance. The objective of this study is to develop a battery accumulator concept that can be used to design the battery accumulators for the team's and the automaker's prototypes, using the PRODIP model of project management. In the informational project, the voices of costumers and technical requirements are defined. In the conceptual project, decision making tools are used to select the concept most adequate for the requirements. The order of definitions started with the selection of the battery cell to be used in the vehicle. Then, possible methods of electrical connection and overcurrent protection were studied. From the disposition of the pack, the cooling of the cells and the material used for the container were considered. The selected concept consists of the use of a cylindrical cell joined by spot welding to nickel strips for protection against balancing overcurrents. The packs are cooled by forced convection, SAE 4340 steel is used for the supports in the plain horizontal position with gussets and SAE 1020 steel is used for the container walls.

Palavras-chave: Battery. Prototype. Electric vehicle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia do trabalho	14
Figura 2 – Vista lateral veículo Fórmual CEM EV	16
Figura 3 – Vista superior veículo Fórmual CEM EV	16
Figura 4 – Acumulador FCEM	26
Figura 5 – Demonstração da solda a ponto	27
Figura 6 – Demonstração de dano às abas na solda por ultrassom	28
Figura 7 – Demonstração do contato por pressão	28
Figura 8 – Diagrama de Ashby para densidade e resistência	29
Figura 9 – Fluxo de etapas do modelo PRODIP	32
Figura 10 – Exemplo de Diagrama de Mudge	32
Figura 11 – Exemplo de matriz de Pugh	33
Figura 12 – Exemplo de matriz de Pugh ponderada	34
Figura 13 – Etapas da metodologia APQP	36
Figura 14 – Diagrama de Mudge	38
Figura 15 – Fluxograma de concepção de soluções	40
Figura 16 – Tabela de seleção de células	41
Figura 17 – Tabela de seleção de células filtrada	43
Figura 18 – Célula selecionada: NCR18650GA	43
Figura 19 – Matriz de Pugh para ligação elétrica	45
Figura 20 – Matriz de Pugh para elementos fusíveis	46
Figura 21 – Matriz de Pugh para o arrefecimento	48
Figura 22 – Fluxograma de seleção de material	49
Figura 23 – Resistência e densidade	50
Figura 24 – Resistência e custo	50
Figura 25 – Gráfico de Ashby para resistência e custo dos metais	51
Figura 26 – Sistema de coordenadas SAEJ670	52
Figura 27 – Condições de posicionamento	52

LISTA DE SIGLAS

Ah Ampére-hora

AIAG *Automotive Industry Action Group*

APQP *Advanced Product Quality Planning*

BMS *Battery Management System*

BOM *Bill of materials*

C Carbono

Co Cobalto

ESF *Electrical System Form*

EV *Electric Vehicle*

FMEA *Failure Modes and Effects Analysis*

FSAE Fórmula SAE

IC *Internal Combustion*

LFP Lítio Ferro-Fosfato

Li Lítio

NCM Níquel, Cobalto, Manganês

NCO Níquel, Cobalto

NCR Níquel e Cobalto recarregável

NMO Níquel, Manganês

PCM *Phase Changing Materials*

PRODIP Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto

SAE Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade

Wh Watt-hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Veículos elétricos	16
2.2	Fórmula SAE	18
2.2.1	Provas da competição	19
2.2.1.1	Provas Estáticas	19
2.2.1.2	Inspeção Técnica	21
2.2.1.3	Provas Dinâmicas	22
2.2.2	Acumuladores para FSAE EV	23
2.2.2.1	Requisitos elétricos	23
2.2.2.2	Requisitos de montagem	23
2.2.2.3	Projetos de outras universidades	24
2.2.2.4	Análise das soluções de células de bateria e sua ligação	26
2.2.2.5	Metodologia de seleção de materiais	29
2.2.2.6	Análise dos modos de arrefecimento	30
2.3	PRODIP	31
2.3.1	Projeto Informacional	32
2.3.2	Projeto Conceitual	33
2.3.3	Projeto Preliminar	34
2.3.4	Projeto Detalhado	34
2.4	APQP	35
3	DESENVOLVIMENTO	37
3.1	Informacional	37
3.1.1	Funções global e complementares	37
3.1.2	Necessidades do cliente e requisitos do projeto	37
3.1.2.1	Diagrama de Mudge	38
3.2	Conceitual	39
3.2.1	Fluxo de decisões de conceitos	39
3.2.1.1	Seleção de célula	40
3.2.1.2	Ligação elétrica	43

3.2.1.3	Fusível de células em paralelo	45
3.2.1.4	Arrefecimento	46
3.2.1.5	Suporte mecânico	48
3.2.2	Conceito definido	53
4	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	56
	ANEXO A	58

1 INTRODUÇÃO

Na indústria automotiva muito se tem debatido sobre qual será o futuro em termos de tecnologia de propulsão. Em 2008, a Tesla entrou no mercado trazendo o modelo Tesla Roadster que desafiava as concepções da época para veículos em termos de desempenho e alcance em uma carga da bateria. A Toyota então já possuía seu modelo híbrido Toyota Prius há 11 anos, porém nenhuma outra montadora havia emplacado um sucesso realmente grandioso com tecnologias de propulsão com energias alternativas. Após a entrada da Tesla e o *dieselgate* (MATSUBARA, 2016) uma tendência para a eletrificação pôde ser percebida dentro de montadoras e cada vez mais governos do mundo todo fortaleceram suas restrições em emissões e consumo de combustível fóssil.

Para o veículo puramente elétrico movido à bateria ainda estão presentes diversos impedimentos para a popularização total. Um dos fatores é o custo inicial de aquisição que ainda é alto (CESAR, 2020). Esse valor pode ser explicado pelos componentes presentes no conjunto de *powertrain* como terras raras presentes no ímãs de motores permanentes ou o cobalto e níquel presentes nas baterias. O lítio não é o componente mais caro ou raro porém sua exploração deve ser levada em consideração para que a rápida demanda de veículos não ultrapasse a produção atual (A.OLIVETTI, 2017). Já o cobalto e o níquel são componentes que chegam a compor mais de 50% em kg/kWh da bateria na tecnologia NCM, baterias compostas de Lítio, Níquel, Cobalto e Manganês. As reservas desse material e outros estão concentradas em países como: Austrália, Chile e Argentina (Li); Congo e China (Co); e China novamente (C). Essa concentração dos materiais do ânodo e cátodo que podem chegar a 80% do custo da bateria, dá uma grande vantagem econômica para manipular o preço do mercado. Essas informações devem ser consideradas no plano estratégico da montadora, pois dessa maneira é possível evitar uma dependência de outros países.

Este trabalho tem como motivação interesses de duas instituições diferentes. Os envolvidos e beneficiados deste estudo são a subsidiária brasileira da montadora francesa Renault do Brasil e a equipe de competição Fórmula CEM da UFSC, participante da competição Fórmula SAE Brasil.

O interesse da montadora é de nacionalizar a sua bateria. Considerando custos de importação, tanto na fabricação como na reposição da bateria, a nacionalização do projeto e de parte dos processos produtivos permite uma maior competitividade da montadora no mercado nacional e da América Latina. A montadora possui uma especificação de um motor elétrico que ela deseja utilizar na eletrificação de seus protótipos e assim iniciar um conceito desenvolvido no país que possa ser comercializado.

O interesse da equipe Fórmula CEM está em se equiparar com as outras equipes de

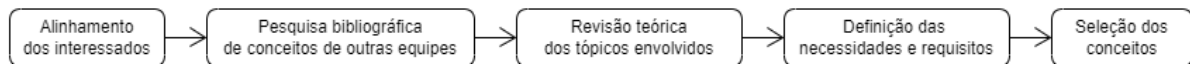
ponta da competição. A competição possui uma restrição de 80kW de potência máxima a ser utilizada em qualquer momento das provas dinâmicas e a potência instalada atualmente no veículo da equipe é de 20kW. Porém, para aumentar essa potência são necessários grandes investimentos que geralmente são inviáveis para as equipes de universidades públicas.

A união de montadora e equipe pode proporcionar a equipe os componentes para aumentar a sua potência instalada e fornece a montadora um ambiente veicular para validação de um projeto e a geração de conhecimento em cima de acumuladores.

Este trabalho foi realizado em meio a pandemia do corona vírus entre setembro e novembro de 2020. A pandemia não só trouxe impactos econômicos para o posicionamento estratégico da montadora como apresentou dificuldades para realização de outras atividades do trabalho como experimentos e necessidade de reuniões por videoconferência.

A metodologia utilizada no trabalho pode ser modelada pela Figura 1.

Figura 1 – Metodologia do trabalho



Fonte: elaborado pelo autor.

Inicialmente foram realizadas algumas reuniões com o orientador da equipe Fórmula CEM e orientador deste trabalho Modesto Hurtado Ferrer e os responsáveis pelos projetos elétricos da montadora Renault do Brasil como o gerente de projetos Luiz Fernando Oliveira.

Após a definição de que a equipe teria conhecimento para se envolver neste projeto, uma pesquisa para elencar tipos construtivos utilizados em outros projetos foi realizada pela revisão da bibliografia existente sobre projetos de acumuladores em FSAE.

Com estes trabalhos foram identificadas as disciplinas da área da engenharia que deveriam ser introduzidas no desenvolvimento de um acumulador de baterias. Este componente é multidisciplinar e envolve uma base de cursos de graduação diferentes porém o curso de engenharia automotiva proporciona um currículo que permite o entendimento de cada uma dessas áreas.

Após estas etapas e com uma visão das dificuldades que serão enfrentadas no projeto é possível iniciar o projeto informacional. Neste são definidos as necessidades e os requisitos do projeto.

Com isso, o projeto conceitual pode ser elaborado. Utilizando as necessidades como critérios de seleção associadas aos requisitos os conceitos são elencados quanto a sua adequação e então o de maior qualidade pode ser selecionado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar o projeto informacional e conceitual de um acumulador de baterias através da metodologia PRODIP para os protótipos da montadora Renault e da equipe Fórmula CEM.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos através dos quais se atingirá o objetivo geral são:

- Definir as funções do produto e os requisitos primordiais na etapa informacional
- Levantar tipos construtivos possíveis
- Determinar conceitos com base nos possíveis tipos construtivos
- Identificar conceito mais adequado com base nos requisitos definidos

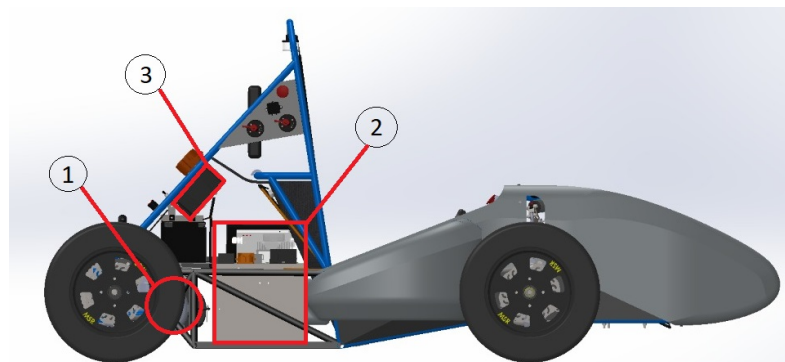
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As próximas seções abordam as teorias que foram necessárias para a realização desse trabalho. Nesse capítulo serão introduzidos os assuntos teóricos abordados no desenvolvimento do projeto.

2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS

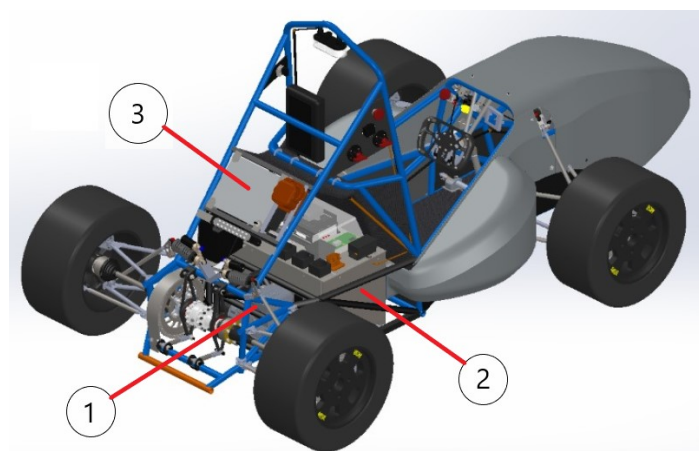
É importante entender a distinção entre veículos à bateria e veículos híbridos. Veículos híbridos também possuem bateria porém há a presença de um motor à combustão e as diferentes topologias determinam o uso e dimensionamento dessas baterias. Veículos à bateria são veículos que dependem exclusivamente dessa para sua propulsão e ela determina seu alcance. Nas Figuras 2 e 3 está disposto o veículo à bateria da equipe Fórmula CEM.

Figura 2 – Vista lateral veículo Fórmula CEM EV



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 3 – Vista superior veículo Fórmula CEM EV



Fonte: elaborado pelo autor.

Os principais componentes do *powertrain* elétrico são o motor (1), a bateria (2) e o controlador do motor (3). A bateria é o componente que armazena a energia que será consumida pelo motor na geração de movimento. O controlador do motor é necessário para modular a tomada de potência pelo motor e definir a velocidade em que andará o veículo.

O controlador recebe os sinais de acelerador do motorista e computa qual a corrente elétrica necessária a ser fornecida ao motor para gerar a resposta esperada. De uma forma simplificada, o motorista faz a requisição de torque ao controlador, o controlador modula a energia fornecida pela bateria e o motor converte essa energia em movimento do veículo através da transmissão às rodas e subsequentemente ao solo.

As baterias podem ser de diversas químicas e cada uma apresenta características de desempenho diferentes. As de veículos de passeio comum são chamadas de baterias de chumbo-ácido, devido à composição do eletrólito de ácido sulfúrico e eletrodos de chumbo esponjoso e peróxido de chumbo (BOYLESTAD, 2012).

Elas são usadas pela sua robustez e capacidade de partida em condições severas, porém a sua baixa densidade energética inviabiliza o seu uso em veículos elétricos.

Esses apenas tornaram-se mais viáveis após desenvolvimentos feitos para as baterias de celulares que utilizam o lítio na sua composição. Desde então diversas químicas e construções foram desenvolvidas utilizando o lítio para criação de células mais potentes e com melhor densidade energética.

Os parâmetros de performance das células são a capacidade em Ampère-Hora(Ah), C Rate em Cs (C), tensão nominal em Volts (V), volume e peso. Com a capacidade e a tensão, é possível determinar a quantidade de energia acumulada na bateria em watts-hora (Wh), o que equivale a um valor em Joules por segundo multiplicado por 3600 segundos.

A corrente máxima de descarga se obtém multiplicando o C Rate pelo valor em Ampère-hora. Por exemplo, uma bateria com 3,6V 10Ah e 10C pode fornecer corrente máxima de $10\text{Ah} \times 10\text{C} = 100$ Ampéres e possui um total de $10\text{Ah} \times 3,6\text{V} = 36$ Wh ou $36 \times 3600 = 129600$ Joules.

Na aplicação veicular é muito importante a análise da distribuição de massa do veículo. Por esse motivo são considerados o peso e o volume ocupado pela célula. Para atingir uma configuração de 36V poderiam ser utilizadas 3 baterias de chumbo-ácido ou 10 células de lítio polímero com tensão de 3,6V porém a massa total do conjunto teria uma grande diferença.

A energia específica é a quantidade de Joules ou Wh que uma célula de bateria armazena dividido pelo seu peso. Células com alta energia específica providenciarão maior alcance ao veículo com menor peso. Analogamente, a densidade energética é obtida pela divisão da energia armazenada em Wh pelo volume ocupado.

Tendo em vista ser necessária uma considerável quantidade de células para se ter um alcance comparável a um veículo à combustão, é preferível o uso de células com densidade energética alta para que seja possível a construção de um veículo compacto.

Algumas composições químicas mais usadas são: lítio, ferro, fosfato (LiFePO₄ ou LFP); níquel e manganês (NMO); níquel e cobalto (NCO ou NCR). Essas diferem nos seus parâmetros de desempenho e podem apresentar maior instabilidade em condições de alta ou baixa tensão e alta ou baixa temperatura.

Para evitar células mortas ou células balanceadas erradas em um *pack* é necessário a presença de um Battery Management System (BMS). Ele pode ser analógico ou digital em sua natureza de medição de tensão (SUSANTO, 2012). Esses aparelhos aquisitam a tensão de cada célula de modo a controlar a descarga e o balanceamento de células.

O balanceamento é o nome dado às correntes entre células quando geradas por pequenas diferenças de tensão dentro de um *pack* ligado em paralelo. Por exemplo uma célula de 3,6V ligada em paralelo à uma célula de 3,7V receberá corrente da célula mais carregada e a carga entre elas será equilibrada. Se uma bateria descarregar além do seu limite mínimo de tensão ela pode "morrer", ou seja, quando a célula descarrega por completo e perde tensão. As outras células em paralelo fornecerão corrente a essa célula morta, porém em uma condição semelhante a um curto-circuito e isso pode causar instabilidade térmica.

Esta instabilidade é uma condição em que o aumento de temperatura da célula acelera os processos exotérmicos das reações químicas, aumentando ainda mais o aquecimento e elevando a pressão de gases internos que podem romper as camadas da célula. Esses gases ao entrar em contato com o oxigênio da atmosfera se inflamam e podem causar incêndios (WANG et al., 2012).

O BMS pode ter duas topologias, a centralizada ou distribuída (REINEMAN, 2013). Na topologia centralizada existe um módulo analógico apenas que terá cabos conectados aos polos de cada uma das células para medição analógica da tensão. Se existirem muitas células em série o BMS necessitará ter muitas entradas para medição de tensão (MEAH; HAKE; WILKERSON, 2020).

Já na topologia distribuída cada célula possui uma placa sensoriando sua tensão e temperatura e um módulo mestre pode desconectar as células quando um dos módulos digitais escravos indicar uma operação indevida (SUSANTO, 2012).

2.2 FÓRMULA SAE

A competição se iniciou com o nome de mini-Indy nos Estados Unidos (SAE, 2010) e o objetivo era introduzir os alunos de graduação nos conceitos da dinâmica veicular e de engenharia de corridas, necessários para atuação nas diferentes categorias do automobilismo. A competição ganhou popularidade com a participação de apoiadores da indústria automotiva e gerou o nascimento do braço europeu da categoria, chamado de *Formula Student*.

Com o passar dos anos e a presença da Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade (SAE) em diversos países, hoje se encontram competições no Brasil, Índia, Japão e até mesmo na

Austrália. Essas competições são oportunidades para os alunos apresentarem seus conhecimentos à juízes que fazem parte do mercado profissional e dá a oportunidade às montadoras e sistemistas de procurarem talentos e soluções inovadoras nas diferentes equipes universitárias.

A competição acontece anualmente e, no Brasil, tem como parte da premiação a possibilidade de representar o país na competição internacional realizada nos Estados Unidos. Ela é organizada pela SAE Brasil porém segue o mesmo regulamento aplicado à competição americana (SAE, 2019).

Existem duas categorias atualmente no Brasil, veículos à combustão (IC) e veículos elétricos (EV). O primeiro colocado na categoria IC ganha a inscrição na competição da mesma categoria em Michigan e o primeiro colocado EV participa da competição em Lincoln. Os projetos são julgados em diversos quesitos e são atribuídos pontos para cada prova, gerando assim as colocações de cada equipe.

2.2.1 Provas da competição

As provas são divididas entre estáticas e dinâmicas. As estáticas são provas de projeto onde os alunos apresentam todos os estudos realizados e metodologias usadas no desenvolvimento dos protótipos, enquanto as dinâmicas servem para avaliar o desempenho do veículo em pista. As provas estão listadas a seguir:

- Estáticas:
 - Design Event;
 - Custos e Manufatura;
 - Real Case;
 - Presentation Event.
- Dinâmicas:
 - Autocross;
 - Acceleration;
 - Skidpad;
 - Enduro;
 - Eficiência energética.

2.2.1.1 Provas Estáticas

Na prova de Design Event, devem ser apresentados os requisitos usados para tomadas de decisão, as premissas usadas no projeto e a sequência de atividades na integração dos diferentes setores do carro. É interesse dos juízes saberem quais as ferramentas de simulação e cálculos foram usados nos dimensionamentos, quais critérios de seleção de materiais ou de peça adquiridas. Um ponto sempre trazido é o processo de escolha entre aquisição ou projeto (*make or buy*).

Os alunos também são questionados sobre quais testes foram realizados e os resultados obtidos, e se houve conferência desses com os cálculos. É esperado que tenha sido feita a validação do veículo e aplicadas estratégias de mitigação de riscos dos modos de falha. Também é avaliada a organização gerencial da equipe. Esta prova é separada entre Propulsão, Eletrônica, Suspensão, Chassis, Transmissão, Freios e Gestão, cada uma com seu juiz e critérios de avaliação específicos.

Para a prova de custos e manufatura, adota-se uma abordagem pela visão da Engenharia de Produção. Os projetos melhor pontuados são aqueles que levam em consideração: a comunização de componentes; facilidade de montagem; manuais de uso e de montagem; escolha de materiais comuns com processos de fabricação simples e possibilidades de acerto do veículo usando poucas ferramentas e em pouco tempo. As equipes devem demonstrar o tempo de montagem dos veículos e vistas explodidas que mostram a quantidade de componentes.

A parte de custos é analisada usando uma *Bill of Materials* (BOM) comunizada entre todas as competições de Fórmula SAE chamada também de *Cost Report*. Nesse relatório devem ser listados e orçados, usando uma tabela da competição, todos os componentes do veículo e seus respectivos processos de fabricação.

Muitas das peças dos carros são fabricadas com auxílio dos parceiros que cada equipe tem o dever de captar sozinha. Sendo assim equipes com mais patrocinadores teriam vantagem nessa prova se a mesma tabela não fosse usada para todos os orçamentos. Com isso, é equilibrada a pontuação entre equipes que valorizam análises sobre os melhores métodos de fabricação ao invés daquelas que possuem parceiros com as tecnologias mais avançadas do mercado.

Esse relatório é dividido por áreas e as áreas são divididas por *assemblies*. Cada *assembly* é composto de várias partes e cada parte possui os seus processos de fabricação listados em sua respectiva página.

Na página do *assembly* se encontram os processos de montagem das partes que o constituirão, como por exemplo o posicionamento da peça, alinhamento com furos e parafusamento com chaves ou conexão de conectores de chicote. Todos esses detalhes devem estar descritos e detalhados no *Cost Report* e na prova de custos cada item faltante percebido pelo juiz é tomado como penalidade contra a equipe na pontuação.

Para a prova do *Real Case*, segue-se a filosofia parecida à da prova de custos e manufatura, porém aplicada a um produto específico em vez do veículo e são abordados mais detalhes do desenvolvimento. A prova pretende simular uma apresentação de projeto de engenharia para um possível cliente em uma montadora, como se estivesse sendo realizada uma venda daquele projeto e do componente para a integração dele em um veículo.

O componente a ser oferecido é divulgado apenas mais próximo da competição para que as decisões de projeto já tenham sido tomadas e seja analisado o desenvolvimento real feito na peça ao invés de um estudo de direcionado à prova de *Real Case*.

O *Presentation Event* é outra prova que desafia os alunos a mostrarem seu planejamento comercial, colocando-os em uma situação de negócios real onde devem apresentar um plano estratégico de volume de fabricação do veículo projetado e uma análise de mercado que justifique investimentos para essa implementação. Os juízes dessa prova costumam ser de base mais executiva do que os de outras provas que possuem base mais técnica.

2.2.1.2 Inspeção Técnica

Antes de estar apto a participar das provas dinâmicas, todo veículo deve passar por uma sessão de *scrutineering*. Essa sessão tem duas partes para os veículos elétricos: a inspeção elétrica e a inspeção mecânica.

Os veículos à combustão precisam passar apenas pela inspeção mecânica. Nessa sessão são verificados todos os pontos eliminatórios listados no regulamento da competição, esse que possui muitos capítulos restringindo diversas características do veículo, como diâmetro de restrição obrigatória no corpo de admissão de ar nos veículos IC ou tensão máxima nos EVs.

Várias restrições quanto aos materiais que podem ser usados no chassi são impostas no regulamento e também sua geometria. Outros requisitos são tipos de fixação permitidos, funcionamento dos circuitos elétricos e eletrônicos, e também informações sobre *packaging* e posição do piloto. Alguns gabaritos são usados para garantir atendimento às dimensões citadas no regulamento e algumas normas são usadas para definição de itens de segurança como cintos, capacetes ou macacões.

Na inspeção elétrica são feitas análises sobre as decisões de projeto e materiais elétricos usados para garantir que boas práticas de segurança foram utilizadas. Na inspeção é revisada a documentação exigida do projeto elétrico do sistema trativo. Esses são a FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) e o *Electrical System Form* (ESF).

A FMEA lista todos os modos de falha que o sistema trativo pode apresentar e a equipe deve apresentar as estratégias de mitigação dos riscos. O ESF detalha todo o circuito do sistema trativo, incluindo diâmetro de cabos, corrente máxima de todos os componentes, *datasheets* de sensores, contadores, células e outros componentes do circuito.

Após a revisão do projeto e garantida a segurança para se energizar o veículo, os juízes conduzem provas para avaliar se o comportamento do sistema trativo corresponde com o determinado no regulamento. Após a aprovação dessa etapa, o veículo passa pelo *Rain Test* e pelo teste de carregamento.

No *Rain test* o veículo deve permanecer debaixo de um jato de água com o sistema trativo ligado e não deve apontar nenhuma queda de isolamento ou desativação do sistema trativo.

Para confirmar que o veículo pode ser carregado com segurança deve ser utilizado o carregador trazido pela equipe e esse deve se comportar como o esperado pelo regulamento, com as luzes de indicação requeridas e desligamento em caso de perda de isolamento ou mensagem

de erro no BMS.

Já na inspeção mecânica são verificadas todas as configurações do chassi, ergonomia e demais condições do veículo. A posição do piloto é avaliada em relação as dimensões citadas no regulamento para o chassi, os gabaritos para o chassi de espaço mínimo são avaliados, os parafusos estruturais devem seguir a norma de dimensionamento, a triangulação dos tubos dos chassi deve estar de acordo com o esperado e a prova de saída do piloto é realizada. Nessa prova o piloto deve sair do *cockpit* em até 5 segundos, da posição sentado com o cinto afivelado, retirando o cinto e o volante e ativando o botão de emergência na saída.

Na sequência são feitas a prova de *Tilt table*, necessária para avaliar a condição de tombamento e vazamento de fluidos do veículo, *Noise test*, prova para aferir o ruído de aviso de veículo ligado, e o *Brake test*, que verifica a capacidade do circuito hidráulico dos freios de fornecer força suficiente para travar as quatro rodas. Somente após todas essas verificações o veículo está liberado para entrar em pista e competir nos eventos dinâmicos.

2.2.1.3 Provas Dinâmicas

A prova de Aceleração, como o nome sugere, mede a capacidade de arrancada do veículo. Ela é realizada em uma reta de 75 metros e os carros são pontuados de acordo com o tempo necessário para cobrir essa distância.

A prova de *Skidpad* mede a capacidade de contornar curvas fechadas e é realizada numa pista disposta por cones em formato de 8, onde o veículo deve entrar na pista na junção dos dois círculos e realizar 2 curvas para a esquerda e então 2 curvas para a direita para então novamente sair pela junção dos dois círculos. Com acerto na suspensão para se utilizar a transferência de carga de modo a aproveitar o máximo do desempenho do pneu, um veículo com baixo centro de gravidade (CG) e uso de aerodinâmica para maior aderência poderá desenvolver velocidade mais alta nessa prova e, conseqüentemente, uma pontuação melhor.

Já na prova de *Autocross* o veículo se encontra em um circuito definido com retas, *slaloms*, e *chicanes*. Nessa prova os pilotos completam uma volta apenas, um de cada vez, e a pontuação é atribuída por menor tempo.

No Enduro utiliza-se um circuito muito parecido ao do *Autocross* porém os veículos devem percorrer vinte e duas voltas sem apresentar falhas e no menor tempo possível. Nessa prova podem participar até três veículos ao mesmo tempo. Ao terminar as vinte e duas voltas os veículos saem da pista e não podem ser mexidos para que os juizes refaçam uma última inspeção e meçam o consumo de combustível ou bateria durante a prova.

Aqueles que não apresentarem irregularidades têm sua pontuação da prova validada e são ranqueados para a prova de eficiência energética. Os veículos com menor consumo ganham maior pontuação Nessa prova final e então após a computação de todos esses resultados a classificação final é divulgada.

2.2.2 Acumuladores para FSAE EV

Veículos do tipo Fórmula necessitam de acumuladores que atendam às restrições específicas do regulamento da competição (SAE, 2019). Esses requisitos podem ser aplicados às ligações elétricas ou ao arranjo de conjunto de baterias. Nessa seção serão listados alguns dos requisitos de segurança elétricos do acumulador e em seguida os de arranjo.

2.2.2.1 Requisitos elétricos

O dimensionamento de fusíveis e cabos deve ser feito usando a corrente de pico a ser extraída do acumulador. Células em paralelo devem ser conectadas com elementos fusíveis entre elas para evitar descargas com eventuais células mortas. Não é permitido usar a união com solda estanhada no caminho da corrente de potência do sistema trativo.

Para cada célula deve haver o monitoramento de tensão pelo BMS. Se houver células ligadas em paralelo é permitido usar apenas um sensor. Todo acumulador deve ter um fusível geral. Entre cada *pack* de 120V ou seção de 6MJ, dependendo da configuração, deve haver um conector de manutenção que permita a separação dos *packs* sem o uso de uma ferramenta.

O acumulador deve ter um circuito de pré-carga que permita que até 90% seja aplicada nos terminais do inversor antes que seja aplicada a tensão total. A equipe deve dimensionar qual será o tempo de pré-carga considerando o inversor escolhido. Separando o acumulador do veículo devem estar presentes dois relés de alta potência, um em cada polo. Esses relés são chamados de AIRs (*Accumulator Isolation Relays*).

2.2.2.2 Requisitos de montagem

Todos os cabos conectados à alta tensão devem ser identificados pelo uso da cor laranja. O acumulador deve ter um conector de alta tensão que seja completamente isolado. Os segmentos do acumulador devem ter no máximo 12kg. Paredes do contêiner devem ter 0.9 mm de espessura mínima se feitas em aço ou 2,3 mm se feitas em alumínio. Uso de outros materiais devem ser comprovados equivalentes a essas espessuras. O contêiner deve poder suportar acelerações de 40 Gs nas 2 direções horizontais do veículo e 20 Gs na direção vertical.

Os suportes do acumulador podem ser dimensionados com base na massa do conjunto ou podem ser posicionados nos vértices do contêiner. Se dimensionados pela massa total, devem suportar 15kN em todas as direções. Se for escolhida a estratégia de suporte nos vértices, deve ser usada a carga de 1/4 da massa a uma aceleração de 40 Gs (40 vezes a aceleração da gravidade).

O interior do acumulador deve ter um material isolante que seja resistente a chamas. Os terminais de potência devem ser crimpados com o auxílio de um alicate hidráulico hexagonal. As baterias devem estar protegidas contra curto-circuito, caso uma ferramenta metálica como uma chave de boca caia no interior do acumulador.

Também existe ainda o fato de que o juiz que lidera a inspeção mantém a autoridade de reprovar qualquer solução que considere insegura, mesmo que atenda ao regulamento. Como exemplo o requisito listado de crimpagem hexagonal é uma experiência obtida na competição e não está listado no regulamento.

Esses desafios são próprios à competição pois não é do interesse da organização restringir as soluções, por isso não são citadas todas as estratégias preferidas pelos juízes. Caso alguma equipe apresente uma solução inovadora o objetivo da competição de fomentar a ciência também é atingido.

2.2.2.3 *Projetos de outras universidades*

Algumas universidades utilizam a oportunidade do projeto para desenvolver trabalhos acadêmicos em cima de relatórios da competição ou sobre o veículo. Contudo, o domínio da concepção do acumulador geralmente é algo que poucas equipes possuem, levando alguns anos até que a equipe possa ser aprovada na inspeção elétrica, visto a quantidade de requisitos.

Não são muitas as equipes porém que divulgam o projeto de seus acumuladores por completo, até porque durante o desenvolvimento poucas metodologias são de fato aplicadas, por se tratar de estudantes de engenharia. O que se encontra mais facilmente em trabalhos científicos Nessa área são estudos sobre o sistema já desenvolvido ou testes.

Trabalhos como o de Susanto (2012) detalham o sistema elétrico completo do veículo e seguem uma metodologia própria, sem referências a outras estruturas de projeto. Já o trabalho desenvolvido por Yin (2016) segue um fluxo de decisões baseadas em quesitos técnicos para a determinação de um sistema de arrefecimento de acumuladores para FSAE.

Entretanto, da mesma maneira não é atribuída uma metodologia estruturada de projeto, sendo apenas demonstrado como deve ser feito o dimensionamento do sistema. No artigo escrito por Meah, Hake e Wilkerson (2020) podem-se encontrar diversos detalhes técnicos do veículo construído e informações do sistema do acumulador, porém não são apresentados os processos de tomada de decisão usados. O trabalho de Reineman (2013) é o que melhor descreve o cálculo usado para dimensionamento dos *packs* porém também não segue uma estrutura definida de projeto, apenas os dimensionamentos necessários para as soluções escolhidas.

Isso não significa que não existe aplicação de metodologias de projeto no desenvolvimento dos carros de FSAE. Contudo, fica evidente o foco dos trabalhos acadêmicos e do desenvolvimento das equipes na parte técnica e nos desafios de engenharia enfrentados. Na prática toda equipe de ponta possui a sua estrutura de projeto própria, porém o maior benefício percebido para os estudantes sempre é o aprendizado prático e a experiência em desenvolver sistemas complexos.

Analisando as soluções propostas nos trabalhos encontrados levanta-se a possibilidade de aplicação da convecção forçada para o arrefecimento das células demonstrado por Yin (2016).

Nesse conceito são usadas duas células de LFP prismáticas ligadas em paralelo e então ligadas em *umpack* com 10 células em série, totalizando 20 células por pack. Esta equipe optou por utilizar dois acumuladores, um de cada lado do veículo, arrefecidas por uma ventoinha em cada acumulador. A ligação elétrica não é detalhada porém é demonstrado no trabalho que se use algum tipo de folha metálica ligando as células em paralelo e então em série. Supõe-se que as células sejam unidas por solda a ponto ou a laser visto que não há outros componentes para gerar contato elétrico.

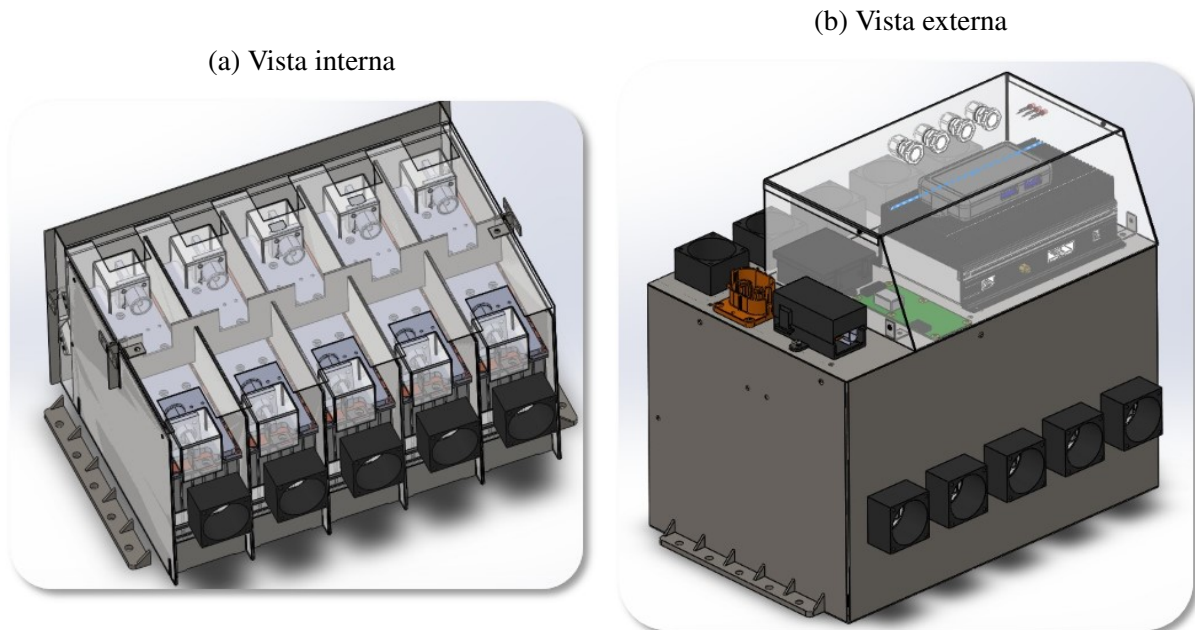
Na configuração detalhada por Susanto (2012) são usadas células também de LFP, porém cilíndricas, e nenhuma informação sobre sua ligação é descrita. Para o acumulador apenas são úteis o uso do fusível ANN de ação rápida usado em empilhadeiras e a aplicação de módulos escravos para o BMS.

No projeto descrito por Reineman (2013), as células prismáticas, também de LFP, são ligadas por meio de uma placa de plástico reforçada com *kevlar*, material chamado Hydlar Z, que usa insertos parafusados para controlar a pressão de contato elétrico. O BMS também é de um modelo distribuído com mestre e escravos, e é sugerido um modelo térmico para arrefecimento por convecção forçada, porém não há informações das ventoinhas selecionadas.

O trabalho de Meah, Hake e Wilkerson (2020) mostra uma aplicação de uso de um radiador para arrefecimento das células, mais uma vez de LFP, e prismáticas ligadas por pressão exercida por uma espuma e contatos de alumínio, que são usados para medição de tensão e temperatura por um BMS centralizado da marca Orion.

No conceito desenvolvido pela equipe é utilizada uma célula de Lítio-ion com Níquel e Alumínio. As células são prismáticas e ligadas por pressão a um barramento usinado em uma placa de cobre e fenolite. Os fusíveis são seções na placa dimensionadas pela corrente máxima de cada célula. As células são arrefecidas por ventoinhas utilizando a convecção forçada. O acumulador possui paredes de aço SAE 1020 soldadas a um suporte de aço 4340 numa configuração plana com nervuras, como apresentado nas Figuras 4b e 4a. O BMS escolhido foi o módulo centralizado da marca Orion.

Figura 4 – Acumulador FCEM



Fonte: elaborado pelo autor.

2.2.2.4 Análise das soluções de células de bateria e sua ligação

Nos trabalhos levantados e trocando experiências em conversas informais com membros de outras equipes participantes da competição nacional e internacional, percebe-se um grande número de equipes utilizando células pouch de LFP. As motivações para tal são a sua capacidade de carga que possibilita em algumas configurações não utilizar células ligadas em paralelo e sua resistência à instabilidade térmica.

Não é possível, porém, fazer uma comparação com as baterias usadas em veículos elétricos de passeio e as células usadas nas equipes pois as fabricantes de baterias desenvolvem projetos específicos para montadoras. Por isso muitas vezes as células usadas em FSAE são de sites de vendas de baterias ou de algum dos poucos fabricantes de células unitárias como A123 e Melasta. As melhores baterias e com as tecnologias mais avançadas não estão disponíveis para as equipes.

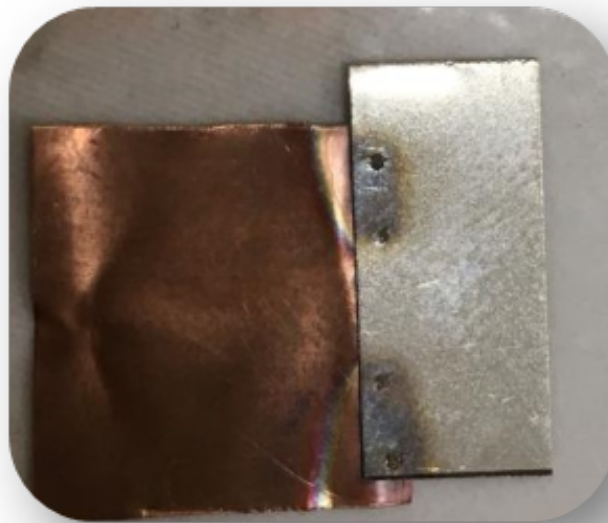
Para a geração de calor e dimensionamento dos fusíveis é usada a mesma teoria que é a do aquecimento ôhmico ou aquecimento por efeito Joule. Quando um material é percorrido por uma corrente elétrica existe uma geração de calor proporcional ao quadrado da corrente e a resistência ôhmica desse material (BOYLESTAD, 2012). A fórmula para o calor gerado é a equação (1):

$$\dot{Q}_{Joule} = Ri^2 \quad (1)$$

Outra área da ciência importante para o desenvolvimento de acumuladores é a de processos de união. Mais especificamente aqueles usados para ligar as células eletricamente.

Um desses processos é a soldagem a ponto ou solda por resistência, mostrado na Figura 5. Este processo utiliza eletrodos posicionados dos dois lados de chapas ou folhas metálicas encostadas e então uma corrente elétrica é aplicada. A corrente é controlada pela resistência dos eletrodos derivadas de suas dimensões e assim se controla a penetração da união (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2009).

Figura 5 – Demonstração da solda a ponto

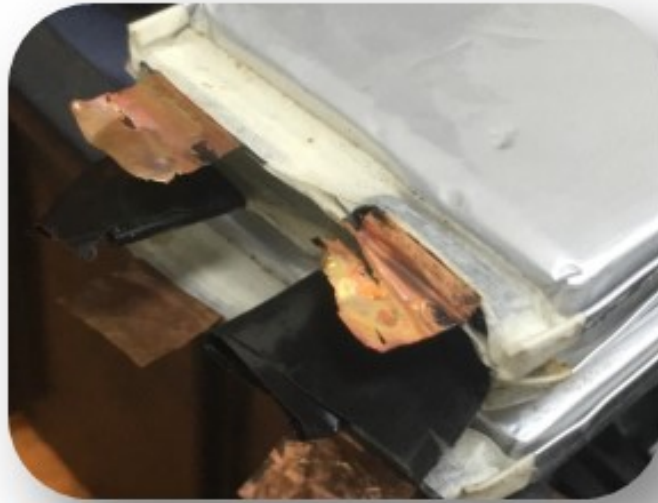


Fonte: elaborado pelo autor.

Outro processo bastante usado é a solda a laser, que utiliza de um feixe de luz altamente concentrado para aquecer uma área bem pequena do material e realizar uma solda localizada. A intensidade do feixe é o que controlará a penetração e esse processo é um que possui grande precisão, porém alto custo de instalação.

Há ainda o processo de soldagem por ultrassom, onde os componentes a serem unidos são submetidos a uma excitação em alta frequência. Essas vibrações mecânicas causam deformações mecânicas localizadas e aquecem os materiais em contato, gerando assim a união (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2009). Este processo é de difícil controle pois cada material se comporta bem diferente durante o processo e experiências passadas na equipe mostraram que esse processo pode danificar as abas de células prismáticas e não gerar uma boa união. Alguns testes foram feitos nas células da equipe e o resultado pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Demonstração de dano às abas na solda por ultrassom

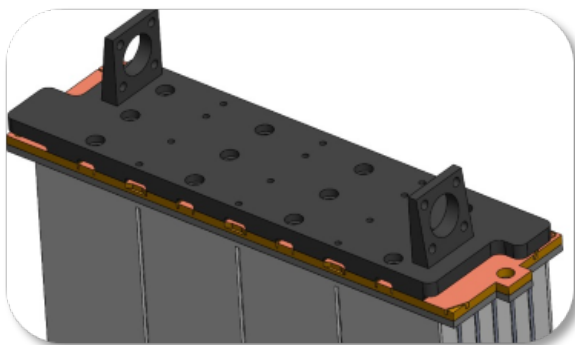


Fonte: elaborado pelo autor.

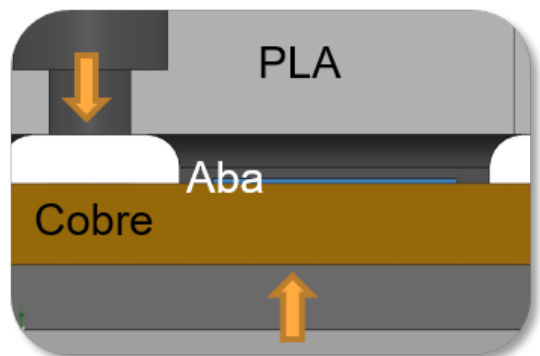
Existe ainda a opção de ligação por pressão de contato entre os polos os abas das células e os fusíveis ou barramento. Para conseguir um bom contato é necessário uma força de pressão considerável. Esse método é o mais suscetível a problemas devido à vibração. A solução da equipe Fórmula CEM é demonstrada na Figura 7.

Figura 7 – Demonstração do contato por pressão

(a) Peça plástica parafusada em cima da placa



(b) Vista em corte do contato

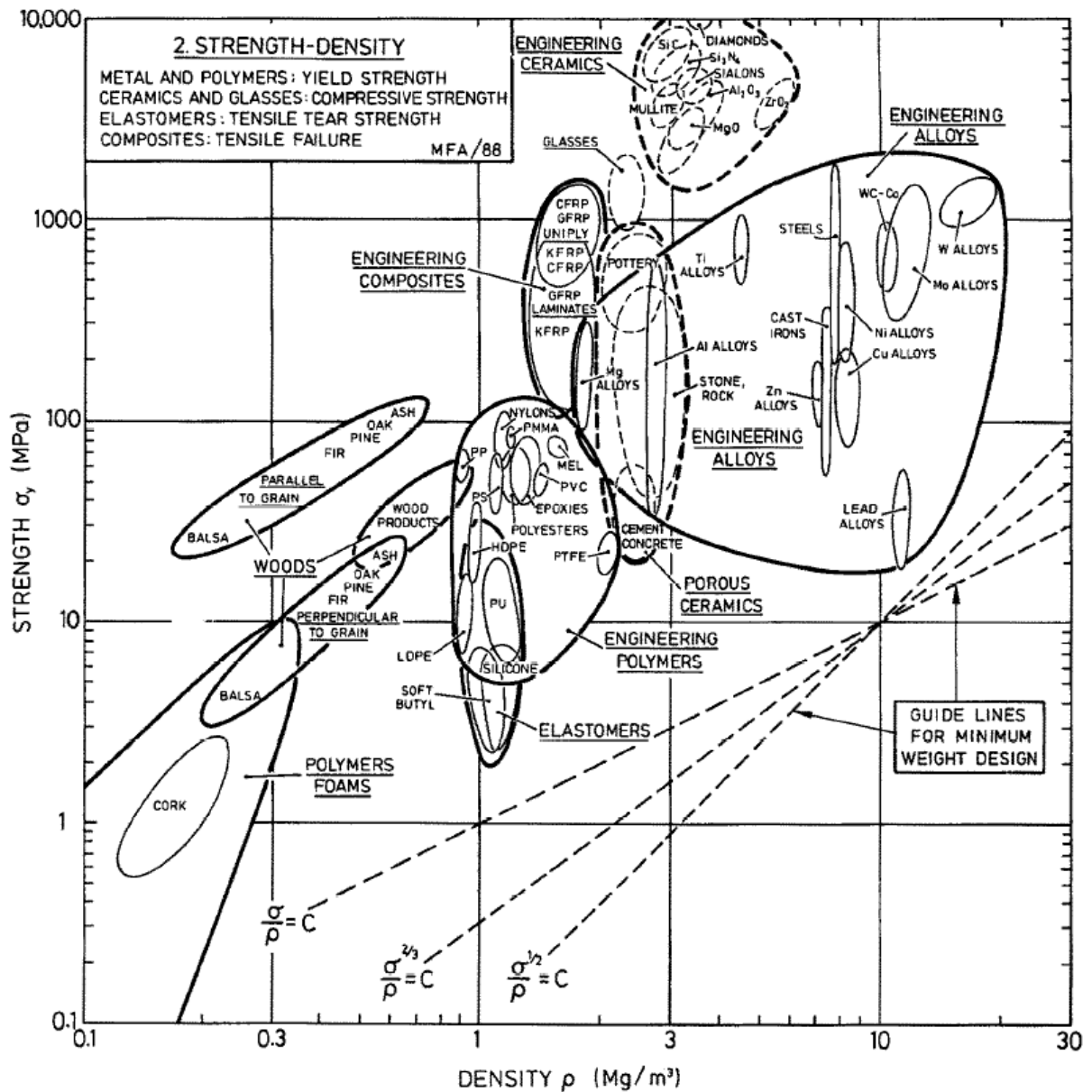


Fonte: elaborado pelo autor.

2.2.2.5 Metodologia de seleção de materiais

Para a seleção dos materiais uma metodologia possível é a proposta por Ashby (1989) que utiliza diagramas considerando propriedades básicas dos materiais. Assumindo que o requisito para uma aplicação seja baixo peso e alta resistência, a Figura 8 demonstra quais materiais seriam os mais indicados pelos gráficos de área.

Figura 8 – Diagrama de Ashby para densidade e resistência



Fonte: (ASHBY, 1989)

Essa mesma lógica poderia ser aplicada a outros requisitos e então cruzadas as classes que mais se adequam a todos eles. Outras características que podem ser analisadas são o custo, a rigidez, a condutividade elétrica e térmica, o alongamento, a reciclabilidade, a temperatura de fusão, entre outras.

2.2.2.6 *Análise dos modos de arrefecimento*

Os métodos de arrefecimento são diversos. Um dos mais comuns é o uso de convecção forçada (YIN, 2016). Nesse método são usadas ventoinhas que força um fluxo de ar sobre a peça realizando a troca de calor por convecção (ÇENGEL; GHAJAR, 2008). A equação que estima vazão mássica que deve ser fornecida pela ventoinha é a equação (2):

$$\dot{m}_{ventoinha} = \frac{\dot{Q}_{cell}}{C_{p_{cell}}(T_{ar} - T_{cell})} \quad (2)$$

Outros parâmetros importantes para o dimensionamento dependem da geometria *dopacke* da característica do fluxo, seja ele laminar, turbulento ou transiente (YIN, 2016).

O uso de trocadores de calor como por exemplo condensadores com gases refrigerantes ou radiadores aletados também são alternativas, porém agregam maior massa e ao conjunto do que apenas ventoinhas. O sistema de condensador utiliza um compressor para elevar a pressão do gás e fornecer a vazão. Esse gás em alta pressão passa então por um condensador que transforma o gás em líquido. Após o condensador, o fluido refrigerante passa por um dispositivo de expansão que reduz sua pressão e permite a troca de fase no evaporador. O calor latente necessário para troca de fase de líquido para gás no evaporador é obtido refrigerando o ambiente (ÇENGEL; GHAJAR, 2008).

O arrefecimento por meio de um radiador com passagem de água e óleo utiliza do escoamento presente quando o veículo está em movimento. O radiador é aletado para aumentar a área molhada pelo ar, melhorando a transferência de calor do fluido para o ambiente. O circuito hidráulico deve ser desenhado de modo a aproveitar o máximo da troca de calor com as baterias e os dutos. Para a movimentação do fluido é necessária uma bomba hidráulica. Esse conceito pode retirar grandes quantidades de calor porém à um custo, o consumo de energia da bomba e o peso adicional do radiador e dos circuitos internos, além de riscos de vazamentos internos no acumulador caso algum duto sofra um rompimento.

O resfriamento utilizando o efeito barocalórico (MILIANTE, 2019) é uma inovação na área de refrigeração e tem visto bastante desenvolvimento na tentativa de substituir os gases refrigerantes pelo seu impacto ao meio ambiente e riscos de incêndio. O efeito está ligado à capacidade do material de aumentar ou diminuir sua temperatura em diferentes condições de pressão. Quando comprimidos rapidamente, esses materiais aumentam sua temperatura,

fornecendo calor ao ambiente. Na descompressão rápida, a temperatura cai e o material então passa a roubar calor do ambiente. Esta fase do ciclo pode ser usada para refrigerar um sistema. Esse conceito requer materiais especiais, sem falar nas complicações que esse requisito traz para o dimensionamento. Testes são necessários para determinar com precisão a eficiência da troca de calor das células com o material sólido.

Por fim há o resfriamento utilizando *Phase Changing Materials* (PCM), ou, em tradução livre, materiais de mudança de fase. A proposta está em utilizar materiais que trocam de fase a uma temperatura próxima à ambiente (PONS; STANESCU, 2017). O material que se encontra em estado sólido, quando colocado num ambiente que está se aquecendo, logo entra em mudança de fase. O calor latente é grande o suficiente para absorver boa parte do calor fornecido pelo ambiente, o que reduz o aquecimento do próprio ambiente, e o material pode ser facilmente substituído. Essa é uma alternativa muito interessante para veículos de competição, que poderiam apenas trocar as cargas térmicas em *pit stops*, e seu arrefecimento não consumiria energia que poderia então ser usada para performance. Sua aplicabilidade dependerá, porém, do potencial de calor latente que os PCMs possuem.

2.3 PRODIP

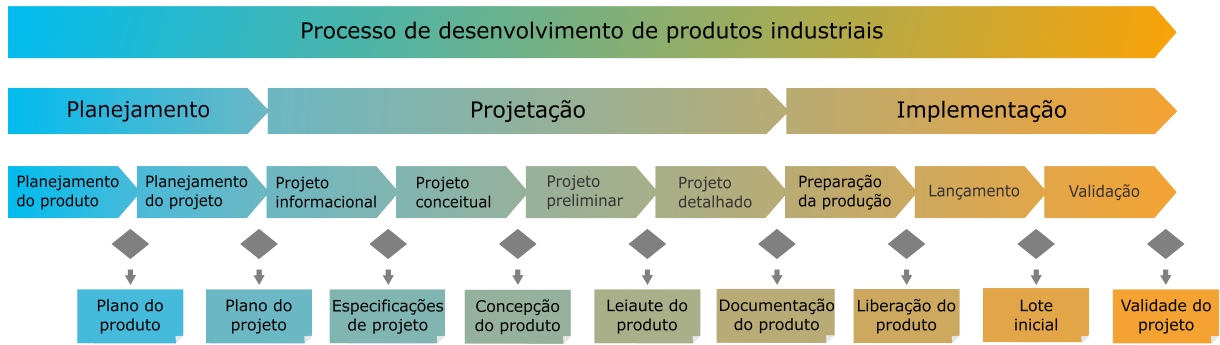
PRODIP é uma metodologia de projeto desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC (BACK et al., 2008) através de estudos de estratégias usadas no setor de máquinas agrícolas e metodologias de projeto sugeridas na literatura (ROMANO, 2003).

Antes do aprofundamento nas estratégias e metodologias alguns termos técnicos muito usados precisam ser definidos pois é subentendido certo conhecimento sobre esses quando se discute gerenciamento de projeto.

O planejamento do projeto consiste em detalhar todas as atividades que serão desenvolvidas e a influência entre cada uma delas. Indentificam-se nessa etapa as tarefas prioritárias e as que podem ser realizadas em paralelo ou que possuem dependência da finalização de outras. A execução do projeto consiste no dimensionamento de peças, desenho de geometrias e estudo dos parâmetros de funcionamento. O detalhamento é o conjunto de tarefas que, após a definição completa do produto, descrevem-no por inteiro, juntamente com seu meio de fabricação, de fornecimento e de manutenção. O ciclo de vida do produto se inicia na fase de planejamento e somente termina após a retirada do produto do mercado.

O PRODIP possui uma sequência de três macrofases. São essas o Planejamento, Projetação e Implementação. Durante o Planejamento são realizados o planejamento do produto e o planejamento do projeto. Já a Projetação é a etapa de execução do projeto, passando pelas fases de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado. Por fim, a Implementação é quando se realiza a preparação da produção, lançamento e validação. A Figura 9 mostra o fluxo e a relação entre as macrofases e fases.

Figura 9 – Fluxo de etapas do modelo PRODIP



Fonte: (ROMANO, 2003)

2.3.1 Projeto Informacional

Seguindo o modelo desenvolvido por Romano (2003), a etapa informacional é aquela que identifica as necessidades dos clientes e determina quais são os requisitos técnicos que impactarão nessas necessidades. Dependendo da complexidade do projeto, essa tarefa pode ser difícil de ser realizada pelo grande número de requisitos ou necessidades, ou pode ser um desafio entender a relação entre cada um deles.

Nessa etapa a valoração dos requisitos é parte importante pois ela será usada como critério de seleção do conceito mais adequado. Somente com o completo entendimento das necessidades do cliente e da valoração eficaz dos requisitos que se garante a concepção de uma solução bem sucedida. Esta atribuição de valores é feita através do Diagrama de Mudge, conforme mostrado por Reis (2002).

No diagrama, todas as necessidades são comparadas em pares e valores são atribuídos a cada uma delas, dependendo da sua importância. Para uma necessidade um pouco mais importante que a outra, é atribuído valor 1. Para uma necessidade mais importante que a outra, é atribuído o valor 3. E para a necessidade que for muito mais importante que a outra, é atribuído valor 5. Um exemplo do diagrama pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Exemplo de Diagrama de Mudge

A - Requisito 1	A	B	C	D	E	Total	Relativo
B - Requisito 2	A	A1	C3	D1	A3	4	20%
C - Requisito 3		B	B1	B1	E1	2	10%
D - Requisito 4			C	C3	C5	11	55%
E - Requisito 5				D	D1	2	10%
					E	1	5%
						20	100%

1 - Pouco mais importante
 3 - Mais importante
 5 - Muito mais importante

Fonte: elaborado pelo autor.

2.3.2 Projeto Conceitual

Podemos definir a etapa de projeto conceitual do modelo PRODIP da seguinte forma:

"A busca de soluções conceituais para o problema é realizada nessa fase do processo. Caracteriza-se pela fase criativa onde as alternativas são geradas e avaliadas técnica e economicamente, e selecionadas as mais representativas para o problema. Os métodos empregados são o da síntese de funções, matriz morfológica e matrizes multicritério de seleção."(OGLIARI, 2020, p1).

O método sugerido por Back et al. (2008) para seleção entre conceitos é a matriz de Pugh. Ela foi desenvolvida como parte da abordagem sistêmica *Total Design Approach* (PUGH, 1991). Este é um método muito simples que envolve dividir as soluções em conceitos e então, usando um deles como referência, atribuir valores (+) e (-) para os outros conceitos e para cada um dos requisitos de projeto. Algumas variações do uso da matriz são encontradas, como por exemplo a análise ponderada usada por Guo et al. (2015) e Floriani, Dias e Rocha (2011). Na Figura 11 temos uma demonstração da matriz considerando todos os requisitos com igual importância. O total de valor positivo significa que o conceito B apresenta maiores vantagens ao conceito A usado como referência. Se houvesse outro conceito de valor positivo aquele com maior total seria o selecionado.

Figura 11 – Exemplo de matriz de Pugh

	Conceito A	Conceito B	Conceito C	Conceito D
Requisito 1		+		
Requisito 2		+		-
Requisito 3			+	--
Requisito 4		-	-	+
Requisito 5			-	
Soma (+)	0	2	1	1
Soma (-)	0	1	2	-2
Total	0	1	-1	-1

Fonte: elaborado pelo autor.

Para se usar o método ponderado é preciso atribuir pesos a cada requisito. O diagrama de Mudge pode ser usado para esse propósito. Após a valoração todos os conceitos são cruzados com os requisitos em uma tabela, como na Figura 12, e cada ponto atribuído ao conceito é multiplicado pelo peso, para então ser somado o total.

Figura 12 – Exemplo de matriz de Pugh ponderada

	Peso	Conceito A	Conceito B	Conceito C	Conceito D
Requisito 1	10%		+		
Requisito 2	30%		+		-
Requisito 3	5%			+	--
Requisito 4	45%		-	-	+
Requisito 5	10%			-	
Soma (+)		0	0,4	0,05	0,45
Soma (-)		0	0,45	0,55	0,4
Total		0	-0,05	-0,5	0,05

Fonte: elaborado pelo autor

Observa-se que a análise dos conceitos comparados à referência se manteve a mesma, porém, quando os pesos são utilizados, é possível ter um resultado diferente. No exemplo, o conceito B anteriormente selecionado perderia para o conceito D na análise ponderada, e o conceito C mostra-se mais fortemente negativo em relação à referência.

2.3.3 Projeto Preliminar

A etapa do Projeto Preliminar é aquela em que o foco está no estudo em detalhes do conceito escolhido. Ferramentas de desenho, simulação e otimização servem como grande vantagens para essa fase. Definições de leiaute e da geometria final dos componentes do sistema projetado serão obtidos no final do projeto preliminar. As matérias-primas necessárias e o processo de fabricação também devem ser saídas dessa etapa. Por esse motivo as atividades do projeto preliminar são aquelas com menos detalhamento em todo o modelo PRODIP pois serão muito específicas do produto desenvolvido.

Em projetos mecânicos o foco das atividades estará na geometria, realizando cálculos de esforços e avaliando o impacto do material na massa ou no processo de fabricação. Para projetos elétricos haverá a seleção de componentes, dimensionamento de condutores ou proteção de sobrecorrente e verificação do funcionamento do circuito. Em projetos hidráulicos será ao realizados a contabilização da vazão, o dimensionamento do circuito e a definição de quais materiais e componentes podem ser utilizados no sistema.

Independentemente do foco, a saída do projeto preliminar é um produto finalizado e validado. Por isso a prototipação e testes de verificação também fazem parte dessa etapa.

2.3.4 Projeto Detalhado

Com o produto já concebido, deve ser feito o seu detalhamento. O projeto detalhado será a soma da documentação completa necessária para produzir o produto. Somente com essa

etapa finalizada será possível fabricar o produto com todas as especificações necessárias para que ele atenda aos requisitos e conseqüentemente às necessidades dos clientes.

Algumas tarefas dessa fase são a concepção de desenhos técnicos, folhas de processo, detalhes do ferramental usado, tolerâncias e especificações da matéria-prima. Com a saída dessa fase é viabilizado o lançamento do produto.

2.4 APQP

A sigla APQP significa *Advanced Product Quality Planning* ou, em tradução livre, Planejamento Avançado da Qualidade do Produto. Como o nome sugere, trata-se de uma metodologia que busca assegurar que o produto tenha a qualidade esperada ao fim do processo de projeto e durante seu ciclo de vida através do planejamento de etapas. Foi desenvolvida pela aliança entre as montadoras General Motors, Chrysler e Ford, união que resultou na organização AIAG (*Automotive Industry Action Group*) em 1984 (AIAG, 2014).

A motivação por trás da criação dessa ferramenta era a possibilidade de se formalizar o processo de entrega de serviços dos fornecedores para diferentes montadoras, dessa maneira permitindo a adequação de soluções já utilizadas e reduzindo custos. Um fornecedor que seguisse os padrões de qualidade e processos estabelecidos estaria apto a suprir mais de uma montadora com um produto ou serviço. Da mesma forma, a montadora tem garantias de que poderá impor às entregas do fornecedor ou até mesmo se beneficiar de validações já realizadas. Por exemplo uma central eletrônica já validada para outra montadora pode ter seu processo de aprovação com custo muito menor e em menos tempo, pois não haverá necessidade de refazer testes se os critérios de qualidade das montadoras são compatíveis.

A APQP é descrita em detalhes num manual distribuído pela AIAG (2008) e nela são desenvolvidas 5 etapas:

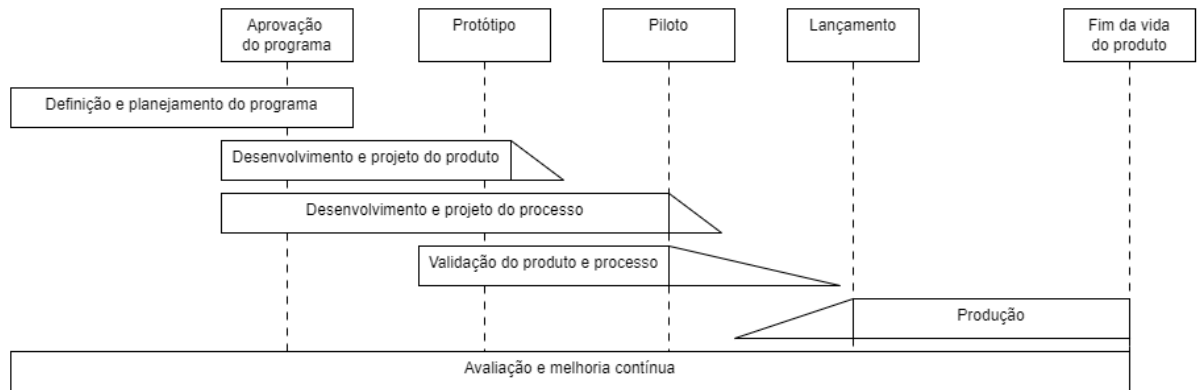
- Definição e planejamento do programa;
- Desenvolvimento e projeto do produto;
- Desenvolvimento e projeto do processo;
- Validação do produto e processo;
- Avaliação e melhoria contínua.

O fluxo completo pode ser aproximado pela Figura 13.

Ao final de cada etapa são atingidos os marcos de projeto, mais conhecidos pelo termo em inglês *milestones*. Na etapa inicial definem-se requisitos de cliente com base em análises de mercado e então é proposto o programa para aprovação.

Programa é o termo que engloba o escopo do veículo, seja um veículo elétrico de passeio ou um utilitário híbrido, e todas as características de negócio relacionadas a esse projeto.

Figura 13 – Etapas da metodologia APQP



Fonte: Adaptado de AIAG (2008)

São estas: para qual mercado ele será ofertado; em quais versões e funcionalidades; onde será sua fabricação e qual o ciclo de vida esperado.

Em seguida é realizada a projeção em que se definem características do veículo. A seguir, é realizada a preparação e a verificação da produção. Com esses veículos produzidos, podem ser realizadas as validações e homologações que permitem que o produto entre no mercado. Após o lançamento, o veículo continua sendo melhorado, usando as experiências com o cliente como entradas para projetos.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 INFORMACIONAL

O projeto informacional deve definir em detalhes quais são os clientes e as funções do produto. Assim podem ser reconhecidas as necessidades passando-se a traduzi-las em requisitos, para então valorizá-los como critérios de seleção de conceitos.

3.1.1 Funções global e complementares

A função global do acumulador de baterias é fornecer potência ao motor. As funções complementares são: possibilitar a concentração do CG numa altura menor; suprir o alcance necessário para testes dos protótipos da montadora e da equipe; não oferecer riscos ao piloto ou no manuseio durante manutenção e ocupar o menor volume possível no veículo.

3.1.2 Necessidades do cliente e requisitos do projeto

Como o objetivo do estudo é eletrificar um protótipo de veículo de passeio por meio de um acumulador validado em um veículo FSAE, devemos definir dois clientes. A montadora, que deseja eletrificar seus protótipos com um fornecedor de baterias nacional. E a equipe, que necessita de um conjunto de baterias para poder participar da competição nacional.

A equipe será beneficiada pelo aumento de potência, desde que o projeto ainda atenda aos requisitos do regulamento. Contudo, não existem outras necessidades que entrem em confronto com as da montadora. Sendo assim, essas são as únicas consideradas para a equipe. Considerando essa dinâmica e de acordo com reuniões realizadas entre os *stakeholders*, as necessidades dos clientes são:

- A - Oferecer capacidade de potência necessária para máximo aproveitamento do desempenho do motor;
- B - Possuir energia suficiente para autonomia de testes em pista;
- C - Manutenção segura;
- D - Agregar pouca massa ao conjunto do *powertrain*;
- E - Possuir volume compatível a um tanque de gasolina de 45L para adaptação nos protótipos;
- F - Escalabilidade dos processos produtivos;
- G - Baixo investimento inicial devido situação de pandemia;
- H - Possibilidade de recarga rápida;
- I - Uso de fornecedores nacionais.

A necessidade A aborda a capacidade da bateria de fornecer a máxima potência disponível pelo motor. Dessa maneira considerando que o motor consiga desempenhar 55kW de pico a bateria deve poder fornecer essa potência. A necessidade B está ligada à capacidade de 16kWh, visto que esse parâmetro ditará quanto tempo a bateria consegue movimentar o carro antes de precisar ser recarregada. A necessidade C é importante por se tratar de um protótipo onde diversos experimentos serão realizados e haverá número alto de intervenções, o que requer uma segurança planejada para evitar quaisquer acidentes de trabalho.

A necessidade D está presente em todos os projetos automotivos, seja impactando na performance ou no consumo de combustível, por isso deve ser inserido na análise. A necessidade E é imperativa por se tratar de um protótipo que não foi desenvolvido inicialmente para adequação da bateria. Portanto a bateria deve ser desenvolvida levando em consideração as restrições do protótipo, e não o inverso. A necessidade F é um dos itens essenciais para garantir a competitividade da montadora assim como a necessidade G e I. A necessidade H é algo desejável, porém não é o foco nessa etapa de funcionamento da eletrificação.

3.1.2.1 Diagrama de Mudge

Para classificação dos diferentes requisitos, foi usado o Diagrama de Mudge, uma das ferramentas da área da qualidade que elenca necessidades do cliente baseados na sua importância comparativa. As reuniões com os responsáveis na Renault pelo projeto foram usadas como entradas para atribuição dos valores na Figura 14.

A - Oferecer capacidade de potência necessária para máximo aproveitamento do desempenho do motor	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total	Relativo
B - Possuir energia suficiente para autonomia de testes em pista	A	A1	C3	D1	A3	F1	G3	A3	A1	8	9%
C - Manutenção segura		B	C3	B1	B3	F3	G3	B1	B1	6	7%
D - Agregar pouca massa ao conjunto do <i>powertrain</i>			C	C3	C3	C3	C3	C3	C3	24	27%
E - Possuir volume compatível a um tanque de gasolina de 45L para adaptação nas mulas				D	D1	F3	G1	D3	I3	5	6%
F - Escalabilidade dos processos produtivos					E	F5	G3	E3	I3	3	3%
G - Baixo investimento inicial devido situação de pandemia						F	F1	F5	I1	16	18%
H - Possibilidade de recarga rápida							G	G5	I3	15	17%
I - Uso de fornecedores nacionais								H	H3	3	3%
									I	10	11%
										90	100%

Figura 14 – Diagrama de Mudge

Como esperado, a segurança sempre ocupa o primeiro lugar. Abaixo dessa necessidade estão as motivações principais para o início do projeto, que são aquelas que podem determinar uma competitividade econômica importante para a montadora no setor de veículos elétricos nacionais. Em seguida, temos as necessidades de desempenho da bateria, que afetam no desempenho do veículo.

Segue a listagem das necessidades em ordem de importância resultante do diagrama:

1. Manutenção segura;
2. Escalabilidade dos processos produtivos;
3. Baixo investimento inicial devido situação de pandemia;
4. Uso de fornecedores nacionais;
5. Oferecer capacidade de potência necessária para máximo aproveitamento do desempenho do motor;
6. Possuir energia suficiente para autonomia de testes em pista;
7. Agregar pouca massa ao conjunto do powertrain;
8. Possuir volume compatível a um tanque de gasolina de 45L para adaptação nos protótipos;
9. Possibilidade de recarga rápida.

Traduzindo estas necessidades em requisitos de projeto e adicionando parâmetros qualitativos e quantitativos de engenharia, obtemos:

- Corrente máxima de 184 Amperes;
- Tensão nominal de 300 Volts;
- Energia total armazenada de 16kWh;
- Grau de proteção mínimo de IP56;
- Processos de montagem;
- Peso menor que 100kg;
- Volume menor que 50L;
- Fornecedores nacionais;
- Investimento inicial menor que R\$50 mil;
- Capacidade produtiva mínima de 10 mil peças por ano.

3.2 CONCEITUAL

3.2.1 Fluxo de decisões de conceitos

O acumulador de bateria nada mais é do que o somatório de diversas configurações de soluções para problemas envolvendo físicas diferentes que no fim garantirão o funcionamento adequado do sistema.

Iniciando pela função global, a primeira solução a ser definida é a seleção da célula, o componente que mais impactará nas características do acumulador. As outras soluções são definidas para que a célula escolhida trabalhe no ponto de operação projetado.

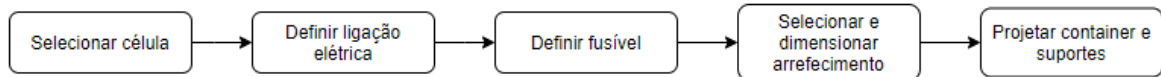
Em seguida, sabendo qual célula será usada pode ser definido o método de ligação elétrica do *pack*. Os processos possíveis são limitados pela geometria da célula e dos polos, assim como da disposição das células no veículo. Ainda no quesito elétrico de ligação das células está

o impacto da seleção dos fusíveis que serão usados entre as células em paralelo, necessários para evitar correntes altas de balanceamento.

Com essa ligação elétrica e a proteção de sobrecorrente definida, podem ser avaliadas as possíveis soluções para o arrefecimento necessário. Determinados o modo de refrigeração e quais componentes terá esse sistema, e sendo integrados à disposição física das baterias, é possível estudar o enclausuramento que servirá como proteção contra intrusões e oferecerá suporte à bateria.

Este impactará também na montagem do conjunto assim como na montagem no veículo. Após todos esses conceitos escolhidos, obtém-se então o conceito final do acumulador de baterias. A Figura 15 demonstra a lógica do processo de concepção de soluções do projeto.

Figura 15 – Fluxograma de concepção de soluções



Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.1.1 Seleção de célula

Na definição das células existe uma grande diferença de abordagem quando se parte de uma montadora ou de uma equipe de competição universitária. As empresas fornecedoras de células como por exemplo Panasonic ou LG possuem grandes interesses em parcerias e desenvolvimentos conjuntos com montadoras, garantindo uso do seu desenvolvimento em novas células. No entanto, quando se trata de um projeto em conjunto com equipes, esse interesse é mínimo devido ao baixo volume empregado e à inexistência de retorno visível a curto prazo.

Existem empresas como a Melasta, fabricante chinesa de células, que oferecem descontos para equipes de FSAE com o intuito de disseminar o conhecimento da marca e se associar a equipes de alto desempenho. Porém esse desconto é diluído em um período de 5 anos e diversos outros fatores entram em discussão na seleção de células.

O ponto inicial do processo de seleção de células é o desempenho esperado do motor. Afinal, essa é a função global do acumulador, entregar a potência requerida. Para esse, projeto é considerada uma tensão nominal de 300V e 55kW de potência de pico. Isso se traduz em aproximadamente 183 Ampéres que serão fornecidos pela bateria. Células de baterias raramente conseguem fornecer uma corrente tão alta e por isso a associação de células em paralelo é necessária. Quão menor for a capacidade máxima de corrente mais células deverão ser associadas em paralelo para fornecer os 183 Ampéres. A tensão é analisada pela mesma perspectiva, considerando que cada célula pode ter entre 2,7V e 4,2V. A tensão do *pack* é definida pela

associação de células em série. Quanto maior a tensão nominal da célula for menor será o número de células para atingir 300V.

Cada célula possui um peso e ocupa um volume devido sua composição e montagem, o que define também suas características. Contudo, escolher uma célula com base nas suas características não é a melhor opção, pois as vantagens singulares de químicas diferentes podem não prevalecerem quando for feito o cálculo da configuração. Para uma maior otimização da definição da célula seria necessário informações do comportamento transiente do motor em ciclos de direção definidos. Como o presente projeto se trata da concepção de uma bateria para protótipos, não existe essa possibilidade e a definição da célula deve ser feita com base nas características levantadas no *datasheet* de cada uma das opções encontradas.

Hoje em dia já existem alguns *sites* especializados em vendas de células de lítio. As células de tecnologia de ponta são fornecidas a projetos especiais e não estão disponíveis à venda, também por estarem nos ciclos iniciais de validação no mercado. Portanto para esse projeto estão sendo consideradas as células encontradas em *sites* de encomenda de células de bateria. Uma pesquisa foi realizada de 15 a 29 de setembro, resultando em 99 modelos de mais de 9 fornecedores diferentes.

O *datasheet* de cada uma delas foi analisado para construir uma planilha eletrônica (Figura 16) que realizasse uma simulação da configuração resultante caso fossem aplicadas. As características resultantes da configuração de cada uma foi utilizada para identificar a célula mais adequada ao projeto dos protótipos.

Figura 16 – Tabela de seleção de células

Código	Tipo	Química	Capacidade	Tensão	Peso	C Rate	Chage Rate	Custo	Volume	Corrente máx	Energia	Densidade
PL-9759156-5C	Pouch	Lítio ion	10 Ah	3,7 V	214 g	5 C	1 C	\$ 32,95	100,7 cm ³	50 A	37 Wh	2,1 g/cm ³
DNNCM-31Ah	Cilíndrica	NCM	31 Ah	3,7 V	680 g	4 C	2 C	\$ 81,72	290,8 cm ³	124 A	114,7 Wh	2,3 g/cm ³
A123 AHR32113	Cilíndrica	Nanofosfato	4,5 Ah	3,3 V	205 g	37 C	27 C	\$ 45,00	90,88 cm ³	166,5 A	14,85 Wh	2,3 g/cm ³
A123 ANR26650M1-B	Cilíndrica	Nanofosfato	2,5 Ah	3,3 V	76 g	20 C	4 C	\$ 9,25	136,8 cm ³	50 A	8,25 Wh	0,6 g/cm ³
A123 ANR26650	Cilíndrica	Nanofosfato	2,3 Ah	3,3 V	70 g	30,43 C	4,35 C	\$ 9,25	136,8 cm ³	70 A	7,59 Wh	0,5 g/cm ³
A123 AMP20	Pouch	Nanofosfato	19,6 Ah	3,3 V	496 g	18,5 C	1 C	\$ 75,00	290,8 cm ³	362,6 A	64,68 Wh	1,7 g/cm ³
ICR18650	Cilíndrica	Lítio ion	1,8 Ah	3,7 V	39,5 g	1 C	1 C	\$ 1,19	17,1 cm ³	1,8 A	6,66 Wh	2,3 g/cm ³
ICR18650	Cilíndrica	Lítio ion	2 Ah	3,7 V	44,5 g	1 C	1 C	\$ 1,32	17,1 cm ³	2 A	7,4 Wh	2,6 g/cm ³

Fonte: elaborado pelo autor.

O cálculo é realizado da seguinte forma. A tensão de 300V é dividida pela tensão unitária da célula. O número de células em série $N_{série}$ deve ser o próximo número inteiro maior a este, conforme a equação (3). Desta maneira garante-se que se terá a tensão necessária com o menor número de células possível.

$$N_{série} \geq \frac{300[V]}{\text{Tensão da célula}} \quad (3)$$

Em seguida deve se determinar a corrente. Deve-se dividir a potência de pico de 55kW

pela tensão de 300V para determinar a corrente de pico necessária, conforme a equação (4). Este valor de corrente é dividido pela capacidade em Ah da célula multiplicada pelo seu C rate. Assim se terá o menor número de células em paralelo $N_{paralelo}$ necessário para uma configuração de tensão e corrente que servem ao motor.

$$N_{paralelo} \geq \frac{\frac{55[kW]}{300[V]}}{Ah * C Rate} \quad (4)$$

Por fim, deve-se olhar para a energia total acumulada, demonstrado pela equação (5). Esse valor é obtido multiplicando o valor de Ah pela tensão nominal da célula. Dividindo a energia de 16kWh por esse valor se obtém o total de células do acumulador.

$$E_{total} = N_{paralelo} * N_{série} * Ah * Tensão da célula \geq 16[kWh] \quad (5)$$

Se o valor de energia do acumulador calculado na equação (5) for menor que 16kWh, então deve-se aumentar $N_{paralelo}$ para aumentar o total de energia do veículo, visto que aumentar $N_{série}$ elevaria a tensão. Assim se obtém também maior autonomia e as células serão submetidas a uma corrente menor que a sua máxima especificada, porém se aumenta o tamanho, peso e custo do acumulador. O número total de células é definido pela multiplicação entre $N_{série}$ e $N_{série}$, como mostra a equação (6).

$$N_{total} = N_{paralelo} * N_{série} \quad (6)$$

Comparando as opções listadas na Figura 17 pode se ver claramente que uma célula se sobrepõe sobre as demais nos três requisitos principais para seleção da célula: potência, peso e volume. O requisito menos importante é o de recarga rápida porém esse possui poucas informações nos *datasheet* e muitas das células não apresentaram nenhuma informação. Essas foram preenchidas na tabela como capacidade de recarga sendo a mesma de descarga, ou seja mesmo valor em Ah. Isso significaria recarga em 1 hora, ou 60 minutos. Quanto às células que não possuíam preço definido foi estipulada uma relação proporcional ao valor da célula atual da equipe utilizando a capacidade máxima de corrente. Por exemplo células com duas vezes maior capacidade foi estimado um custo duas vezes mais alto.

Figura 17 – Tabela de seleção de células filtrada

Código	Tipo	Química	Tempo de recarga	Fornecedor	Série	Paralelo	Peso String	Peso Total	Volume total	Custo estimado	300 V	Tensão do acumulador
PL-9759156-5C	Pouch	Lítio ion	60 minutos	Battery Space	82	6	17,5 kg	105,288 kg	49,5 L	R\$ 65.947,74	55000 W	Potência do motor
DNNCM-31Ah	Cilíndrica	NCM	30 minutos	DiNeng	82	2	55,8 kg	111,52 kg	47,7 L	R\$ 80.223,46	16000 Wh	Energia acumulada
18650HE4	Cilíndrica	Lítio ion	38 minutos	LG	84	22	3,9 kg	86,856 kg	31,6 L	R\$ 73.814,40		
INR18650 MJ1	Cilíndrica	NMC	60 minutos	LG	83	19	4,1 kg	77,273 kg	27,3 L	R\$ 64.456,33		
NCR18650GA	Cilíndrica	NCR	60 minutos	Panasonic	84	19	4,0 kg	76,608 kg	28,0 L	R\$ 42.197,70		
100122200-2C	Pouch	LiFePO4	60 minutos	Battery Space	94	5	47,9 kg	239,7 kg	127,8 L	R\$ 74.919,41		
87122200-2C	Pouch	LiFePO4	60 minutos	Battery Space	94	7	35,9 kg	251,356 kg	141,9 L	R\$ 78.165,38		
10059156-5C	Pouch	NCM	60 minutos	Battery Space	82	6	16,4 kg	98,4 kg	52,6 L	R\$ 95.076,64		
INR-26650-5000	Cilíndrica	NCM	60 minutos	Battery Space	84	13	8,0 kg	103,74 kg	40,6 L	R\$ 86.389,77		
BCPNE20T	Pouch	NCM	200 minutos	BestGo Battery	82	5	33,6 kg	168,1 kg	81,5 L	R\$ 66.631,82		
BCPNE32G	Pouch	NCM	200 minutos	BestGo Battery	82	2	48,4 kg	96,76 kg	49,2 L	R\$ 64.366,55		
BCPNE48M	Pouch	NCM	200 minutos	BestGo Battery	82	2	61,5 kg	123 kg	61,0 L	R\$ 91.549,83		
LC-18650-15M	Cilíndrica	Lítio ion	23 minutos	Samsung	84	36	3,8 kg	136,08 kg	50,7 L	R\$ 83.365,87		
Célula Renault ZOE			60 minutos	LG	84	2	72,1 kg	144,1125 kg	48,9 L	R\$ 10.000,00		

Fonte: elaborado pelo autor.

Esta célula é uma célula cilíndrica, fabricada pela Panasonic e seu custo é o mais baixo para a aplicação desejada, além de resultar em um dos *packs* mais leves e de menor volume. Outras opções possuíam volume menor porém eram de muito maior peso ou vice-versa. Suas dimensões são semelhantes a de uma pilha AAA comum e ela pode ser visualizada na Figura 18.

Figura 18 – Célula selecionada: NCR18650GA



Fonte: Panasonic (2017)

Essa célula possui 3,5Ah e pode descarregar até 10A de corrente de pico. Ela possui uma tensão nominal de 3,6V, pesa apenas 48g e ocupa um volume de 17cm³. Com essa célula é necessária uma configuração de 19 células em paralelo e 84 células em série. Para os *packs*, deve-se respeitar a regra de 6MJ, sendo que uma célula possui 12,4Wh, ou 44.640J. O maior número de células em série com 19 células em paralelo que atende a esse requisito são 7 células em série. Com um *pack* de 7s19p se tem 5,93712MJ. 12 *packs* de 7 células em série com 19 células em paralelo resultam na configuração esperada de 84s19p. O conjunto tem 302,4V e 66,5Ah, com 20kWh.

3.2.1.2 Ligação elétrica

Para células cilíndricas, a ligação elétrica é muito mais fácil em comparação às células do tipo *pouch*, considerando a fragilidade das abas. Assim, existem menos riscos para se utilizar a solda a ponto ou a laser, pois nas células *pouch* deve-se desenvolver o processo através de vários testes até que se atinja o grau de união esperado.

O método de ligação é importante também pois deve resistir a vibração, visto que as baterias não podem perder a conexão com o barramento durante o funcionamento do veículo. Se o contato com as outras células for prejudicado, isso irá sobrecarregar outras células ligadas em paralelo.

Para o estudo foram levantado quatro métodos. Um deles é o usado atualmente pela equipe, de contato por pressão, e exemplos desse método podem ser vistos nos trabalhos de Meah, Hake e Wilkerson (2020) e Reineman (2013). Os outros métodos foram levantados dos conceitos de soldagem. Esses teoricamente possuem melhor comportamento quanto à vibração, porém possuem custos agregados ao processo que devem ser investigados. Os métodos levantados foram a solda a ponto, a solda a laser e a solda por ultrassom.

Para a seleção do método, foi utilizada uma matriz de Pugh ponderada, utilizando as necessidades que são impactadas pela seleção desse conceito. As necessidades foram as seguintes:

- C Manutenção segura;
- D Agregar pouca massa ao conjunto do *powertrain*;
- E Possuir volume compatível a um tanque de gasolina de 45L para adaptação nos protótipos;
- F Escalabilidade dos processos produtivos;
- G Baixo investimento inicial devido situação de pandemia;
- I Uso de fornecedores nacionais.

Todos os processos de soldagem foram valorizados como melhores que o conceito referência escolhido de contato por pressão pela sua resistência à vibração. Considerando também que seriam necessários componentes externos à célula para se efetuar a pressão de contato esse conceito também se prova pior no requisito de peso.

Quanto à escalabilidade, considerando que os métodos usados pela equipe e na literatura encontrada a pressão de contato é feita com peças impressas em 3D, a escalabilidade desse conceito também é pior.

Pela característica física do processo o conceito de solda a ponto é o mais simples e que consumiria menos energia, além de ser de união rápida, portanto é o conceito com melhor pontuação para a necessidade de escalabilidade. Todos os processos de soldagem necessitam porém de maior investimento de instalação, sendo a solda a laser e a por ultrassom as mais caras.

Por fim, quanto ao uso de fornecedores nacionais, prova-se como o melhor conceito a solda a ponto, pela simplicidade do processo, auxiliando não apenas na facilidade de se encontrar fornecedores, como também os desenvolver. Na Figura 19 é possível ver o resultado da matriz como sendo o conceito de solda a ponto.

Figura 19 – Matriz de Pugh para ligação elétrica

	Peso	Contato por pressão	Solda à ponto	Solda à laser	Solda por ultrassom
C	27%	0	+	+	+
D	6%	0	+	+	+
E	3%	0	+	+	+
F	18%	0	++	+	0
G	17%	0	-	--	--
I	11%	0	+	-	--
Total		0	65%	9%	-20%

Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.1.3 Fusível de células em paralelo

Para a proteção de sobrecorrente podem ser utilizadas algumas opções:

- Filamento fusível;
- Tiras de níquel;
- Seção de cobre em PCB.

Os filamentos são fios finos que podem ser de materiais variados para fusão imediata ou de efeito retardado. Esses podem ser soldados a ponto ou estanhados nos polos das células e o diâmetro do filamento determina a sua capacidade de corrente. No caso FSAE, não é permitido o estanho, o que limita as opções de união com esse fusível.

As tiras de níquel são folhas finas de níquel que possuem capacidade de corrente associada à largura e espessura da tira. Elas também podem ser soldadas a ponto ou estanhadas porém apresentam maior facilidade no processo de solda pela sua área maior em comparação com o filamento.

Já as seções de cobre em PCB são parte de uma estratégia em desenvolvimento pela equipe para células *pouch*. Esta estratégia não é utilizada comumente na aplicação de acumuladores de bateria de veículos. Esta ligação se resume em dimensionar uma trilha de cobre em uma PCB que possui largura determinada para a capacidade de corrente definida em projeto.

A PCB é usada na ligação elétrica e permite a integração do barramento ao elemento fusível. A problemática desse conceito está no dimensionamento e na validação das áreas de seção. Devido à alta condutividade e alta temperatura de fusão associada à alta condutibilidade térmica o cobre é um material de fusão mais lenta em comparação com materiais como o níquel.

Para a matriz de Pugh, foram consideradas as seguintes necessidades:

- C Manutenção segura;
- D Agregar pouca massa ao conjunto do *powertrain*;
- E Possuir volume compatível a um tanque de gasolina de 45L para adaptação nos protótipos;
- F Escalabilidade dos processos produtivos;

G Baixo investimento inicial devido situação de pandemia.

Comparando os tipos de fusíveis verifica-se que pela característica de fusão rápida as tiras em níquel e os filamentos possuem maior segurança, além de agregarem muito menor peso do que o cobre. Esses tipos perdem porém em escalabilidade por necessitarem de processos secundários de montagem e mais processos significam também mais custos. O conceito de tiras de níquel se mostrou mais adequado e entende-se que o método de solda a ponto também escolhido possa auxiliar em mitigar as possíveis desvantagens. Os resultados podem ser verificados na Figura 20.

Figura 20 – Matriz de Pugh para elementos fusíveis

Requisito	Peso	Seção de cobre em PCB	Tiras de níquel	Filamento
C	27%	0	++	++
D	6%	0	+	++
E	3%	0	0	0
F	18%	0	-	--
G	17%	0	-	-
	Total	0%	25%	13%

Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.1.4 Arrefecimento

Para a definição do arrefecimento foram levantadas as seguintes possibilidades:

- Convecção forçada;
- Radiador a água ou óleo;
- Ciclo refrigerador com condensador e gás refrigerante;
- Efeito barocalórico de material sólido;
- Material de mudança de fase.

Para montar a matriz de Pugh, novamente as necessidades foram filtradas. A necessidade de fornecer potência foi inserida na análise pela característica térmica da célula. Se for possível manter uma temperatura menor, poderá ser solicitado mais da célula em questão de corrente, e existe uma possibilidade de redução de células em paralelo. Mesmo que esse não seja o objetivo, ainda há o fato de que trabalhar em um ponto de operação ótimo da célula aumentará sua vida útil.

Com um controle efetivo da temperatura, sistemas de frenagem regenerativa podem ser considerados, motivo pelo qual também foi adicionada a necessidade de recarga rápida:

- A Oferecer capacidade de potência necessária para máximo aproveitamento do desempenho do motor;
- C Manutenção segura;
- D Agregar pouca massa ao conjunto do *powertrain*;
- E Possuir volume compatível a um tanque de gasolina de 45L para adaptação nos protótipos;

- F Escalabilidade dos processos produtivos;
- G Baixo investimento inicial devido situação de pandemia;
- I Possibilidade de recarga rápida.

Para comparação da capacidade de potência, faz-se uma correlação com o potencial de remoção de calor. Quanto maior for esse potencial, em teoria seria possível demandar uma maior potência da célula. Radiadores podem ser classificados com um coeficiente global de transferência de calor de 400-850 W/m².K, enquanto evaporadores com condensadores possuem um intervalo de 1000-6000 W/m².K. Para a convecção forçada, podemos estimar esse valor usando as seguintes fórmulas:

$$\frac{\dot{Q}_{cell}}{(T_{ar} - T_{cell})} = \dot{m}_{ventoinha} C_{p_{cell}} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{ventoinha} = A \rho \vec{v} \quad (8)$$

Substituindo (8) em (7) podemos obter:

$$\left[\frac{W}{m^2.K} \right] \frac{\dot{Q}_{cell}}{(T_{ar} - T_{cell})A} = \rho \vec{v} C_{p_{cell}} \quad (9)$$

Usando valores do trabalho de Yin (2016) de velocidade de 8m/s e dados do ar em (9), obtemos:

$$\frac{\dot{Q}_{cell}}{(T_{ar} - T_{cell})A} = 1 * 8 * 1000 = 8000 \left[\frac{W}{m^2.K} \right] \quad (10)$$

Esta dedução sugere que, para uma célula que gera calor \dot{Q}_{cell} a uma temperatura T_{cell} , com temperatura externa T_{ar} , uma ventoinha que forneça um escoamento de 8m/s poderá retirar mais calor se tiver uma área maior. Contudo, o valor de velocidade não é uma constante, e devem ser realizados estudos mais detalhados de dimensionamento para se poder afirmar a capacidade de remoção de calor. Este é apenas um método simplificado de estimativa para poder comparar conceitos. A ventoinha selecionada por Yin (2016) é de tamanho considerável e certamente terá um consumo elevado de energia, o que é compreensível, considerando que 8m/s é equivalente a 28,8km/h e que fornecer um escoamento de velocidade tão alta em um ambiente tão compacto quanto é a bateria não é tarefa simples. Mesmo para escoamento de 1m/s já teríamos o coeficiente global de transferência de calor em 1000W/m².K.

Para a necessidade de manutenção segura avaliou-se quais tipos construtivos possuiriam partes quentes que gerariam risco ao manuseio, justificando assim os valores negativos aos conceitos de radiador e evaporador. Em questão de volume e peso, todos os conceitos são piores que o conceito referência de convecção forçada, pois, ou possuem maior número de

componentes, ou seu princípio físico é baseado na massa, portanto inevitavelmente ocupará mais espaço também. Em questão de escalabilidade e custo foram melhor avaliados os conceitos com menor número de componentes. Para a necessidade de fornecedores nacionais as tecnologias em desenvolvimento tiveram pior avaliação. Por fim, a necessidade de recarga segue a mesma lógica da necessidade de demanda de potência.

Utilizando a matriz de Pugh podemos colocar estas vantagens e desvantagens em comparação para determinar o melhor tipo construtivo para o arrefecimento do *pack*. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 21.

Figura 21 – Matriz de Pugh para o arrefecimento

	Peso	Convecção forçada	Radiador	Evaporador	Efeito barocalórico	PCM
A	9%	0	-	0	-	-
C	27%	0	-	-	+	+
D	6%	0	--	--	--	--
E	3%	0	--	--	--	--
F	18%	0	-	-	-	+
G	17%	0	-	--	-	-
H	3%	0	-	0	-	-
I	11%	0	+	+	-	-
Total		0	-80%	-85%	-49%	-13%

Fonte: elaborado pelo autor.

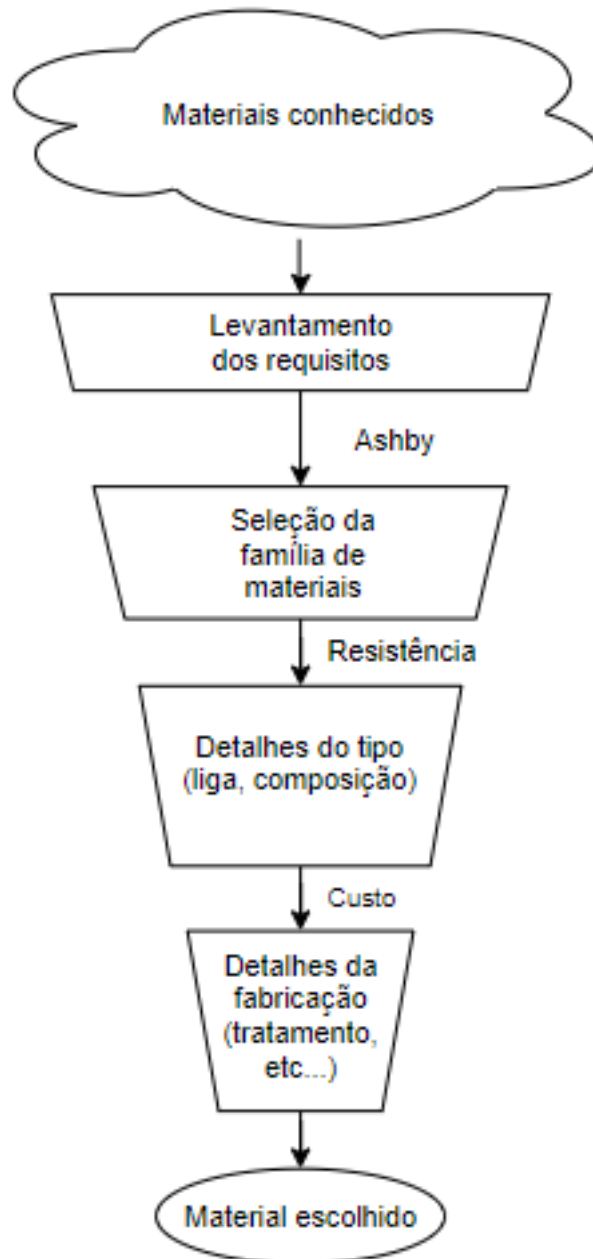
3.2.1.5 Suporte mecânico

O suporte mecânico impactará na proteção do acumulador. A estrutura do chassi do veículo serve de proteção contra intrusões, portanto o foco do suporte é a de fixação de modo a evitar a movimentação. Em casos de colisões o suporte deve manter a bateria fixa e evitar que essa se movimente dentro do veículo ou seja arremessada para fora dele.

Para esta definição, leva-se em consideração o requisito de resistência, a montagem do acumulador e o processo de fabricação. Parâmetros observados em projetos passados colocam limite de resistência a tração mínima de 100MPa para que os materiais sejam considerados na análise.

O método de seleção do material segue a filosofia criada por Ashby (1989) de seleção de materiais, demonstrado na Figura 22, e a concepção da geometria é baseada no impacto que a peça terá na montagem do acumulador no veículo. O *Cost Report* da competição possibilita um parâmetro de comparação interessante à equipe para detalhamento dos diferentes modelos geométricos possíveis.

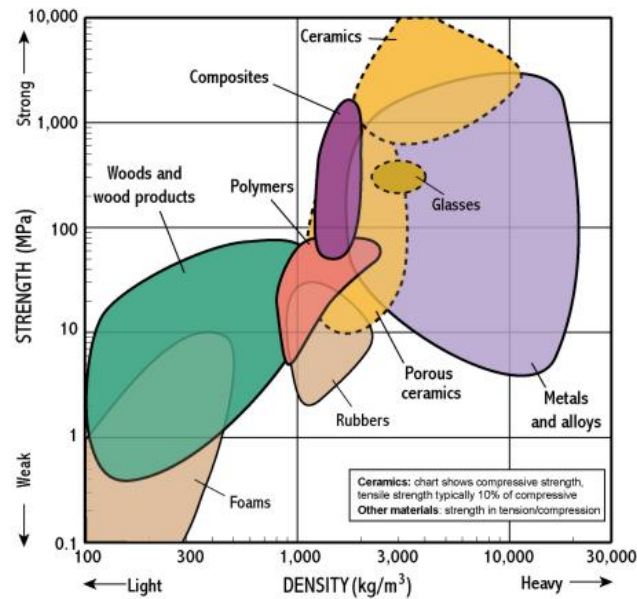
Figura 22 – Fluxograma de seleção de material



Fonte: elaborado pelo autor.

Observando o gráfico de Ashby na Figura 23, pode se observar a relação que existe entre a resistência e a densidade. Para a esquerda da figura se visualiza os materiais mais leves e para o topo os materiais mais resistentes. Os melhores materiais para a aplicação são aqueles que estiverem acima do limite de 100MPa e estiverem mais à esquerda. São eles, os compósitos, as cerâmicas, os metais e as cerâmicas porosas.

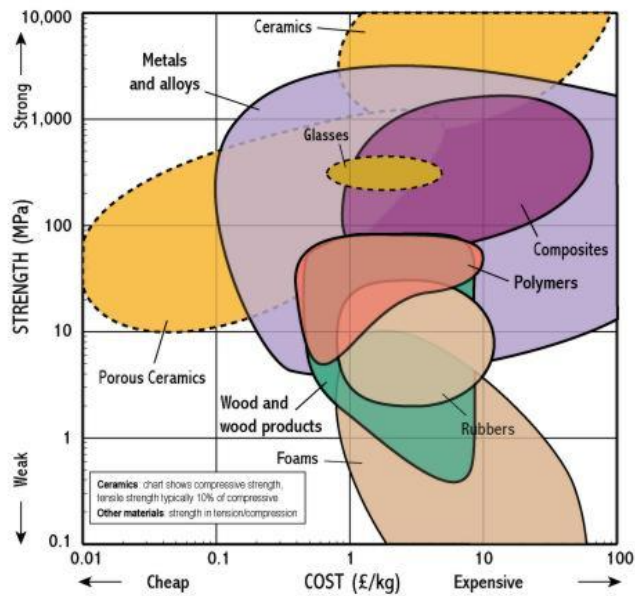
Figura 23 – Resistência e densidade



Fonte: Ashby (2002)

Já na Figura 24, fica clara a desvantagem dos compósitos e das cerâmicas na relação entre resistência e custo. As cerâmicas porosas apresentariam vantagem em custo porém possuem resistência abaixo dos metais, inviabilizando seu uso.

Figura 24 – Resistência e custo

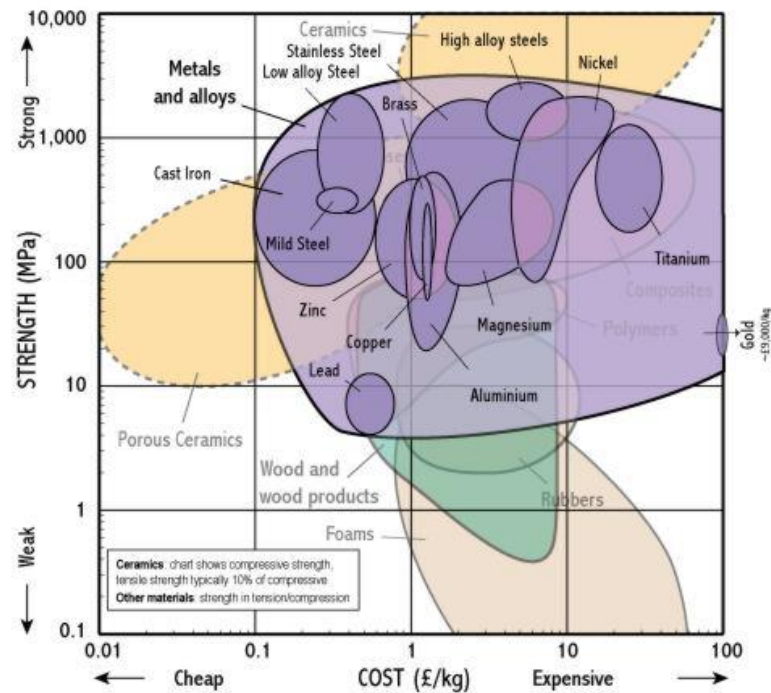


Fonte: Ashby (2002)

Considerando os metais como a família que mais se adequa aos requisitos de alta resistência e baixo custo, a análise deve observar quais metais podem ser utilizados. A Figura 25

traz detalhes das propriedades mecânicas e econômicas dos metais.

Figura 25 – Gráfico de Ashby para resistência e custo dos metais



Fonte: Ashby (2002)

O aço SAE 4340 é um aço de baixa liga e alta resistência que pode alcançar valores maiores ainda com tratamento térmico. Nota-se na Figura 25 que esses aços são os que melhor se apresentam para parâmetros de resistência e custo (*low alloy steels*). A equipe também já desenvolveu fornecedores locais para essa liga em projetos anteriores, através da realização de testes de tração do material no seu estado normalizado e temperado.

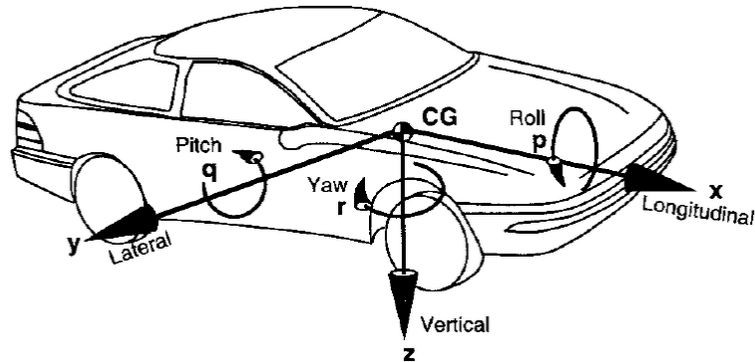
O aço utilizado no contêiner não tem o mesmo requisito de resistência visto que o esforço é concentrado no suporte. Para redução do custo podem ser usadas chapas de aço da liga SAE 1020, que pode ser facilmente encontrado. Esse material também é classificado como "aço doce", que são os aços de baixo carbono (*mild steel* na Figura 25).

A posição e geometria do fixador foi estudada pelas diferentes possibilidades de união e de posição do elemento de união.

A solda desse componente diretamente no chassi impede a de remoção da bateria do veículo, portanto não pode ser considerada para um projeto de protótipos ou do veículo FSAE no qual será validado o componente. O método de união que permite a remoção e fixação robusta deve ser o parafusamento.

Para a posição do parafuso existem quatro possibilidades, considerando o sistema de coordenadas a seguir na Figura 26:

Figura 26 – Sistema de coordenadas SAEJ670

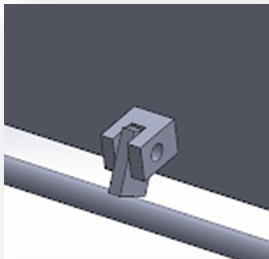


Fonte: Adaptado de SAE (2008)

1. Paralelo ao eixo X
2. Paralelo ao eixo Y
3. Paralelo ao eixo Z
4. Inclinado em qualquer um dos eixos

Figura 27 – Condições de posicionamento

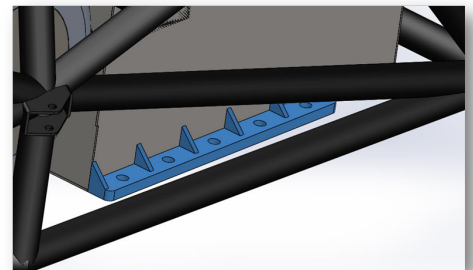
(a) Condição 1



(b) Condição 2



(c) Condição 3



Fonte: elaborado pelo autor.

Na condição 1 (Figura 27a) o parafuso manterá o acumulador apoiado, facilitando o parafusamento, porém as peças nessa condição devem ser separadas para cada parafuso, o que significaria mais usinagem e mais soldagem. Se os parafusos estivessem em alturas diferentes, poderia ser usada uma peça plana na vertical, porém isso não seria aplicável ao veículo Fórmula, pois ele não possui colunas. A condição 2 (Figura 27b) também oferece apoio, porém o parafuso nessa condição estaria em cisalhamento simples, uma condição ruim para dimensionamento de suportes mecânicos estruturais.

Já na condição 3 (Figura 27c) o parafuso não oferece apoio e o acumulador deve ser suportado por algum outro método externo durante o parafusamento até que esteja preso pelos

parafusos porém o parafuso é mantido em tração, a melhor condição para aplicação de carga. A manufatura da peça é simplificada, podendo ser utilizados cortes bidimensionais como a laser, a água, com plasma ou oxicorte, processos altamente escaláveis. A solda desse conceito também é facilmente mecanizada em razão de a maior parte do perímetro ser de caminho reto. O uso de nervuras prejudica esse fator porém reduz em muito a espessura da peça e, conseqüentemente, o peso além da matéria-prima. As nervuras também podem ser cortadas a água e tanto o veículo Fórmula quanto os protótipos terão longarinas estruturais que poderão ser utilizadas.

A condição 4 possui um apoio parcial porém pode dificultar a montagem dependendo do ângulo de entrada do acumulador no veículo e do ângulo de inclinação do fixador. No veículo Fórmula isso é impraticável devido o espaço reduzido reservado ao acumulador e essa configuração é a que mais dificultaria a soldagem do suporte nas paredes do contêiner pela necessidade de um gabarito.

Sendo assim, a única opção que se mantém com a possibilidade de uma geometria só para todos os parafusos e de fabricação simples e adequada para o veículo Fórmula e os protótipos da Renault é a condição 3.

3.2.2 Conceito definido

Após todas as análises dos conceitos possíveis e as decisões tomadas utilizando a comparação desses com os requisitos e necessidades, o conceito definido foi a seleção da célula cilíndrica NCR18650GA, de 3,6V e 3,5Ah, em uma configuração de 84 células em série e 19 em paralelo, ligadas a uma tira de níquel por solda a ponto para as ligações em paralelo, arrefecidas por convecção forçada usando eletroventiladores comerciais, enclausuradas por chapas de aço SAE 1020 recortadas a laser e soldadas, com suportes de aço SAE 4340 em formato plano com nervuras.

4 CONCLUSÃO

Os objetivos específicos do trabalho foram alcançados. Foi possível identificar, através da ferramenta PRODIP, as necessidades dos clientes envolvidos. Com as necessidades e a ferramenta de valoração do Diagrama de Mudge foi atingido o objetivo de elencar requisitos e critérios de seleção de conceitos.

Através da pesquisa bibliográfica o objetivo de levantamento de uma variedade de conceitos possíveis também foi completo. Assim, permitiu-se a criação de matrizes de Pugh para determinar os conceitos mais adequados para cada desafio de engenharia. Novamente as ferramentas do PRODIP se provaram de grande valor.

Com isso, conclui-se que o objetivo geral do trabalho foi concluído, com uma definição de conceito que agora pode ser dimensionada e verificada na etapa do projeto preliminar.

Outras conclusões retiradas do trabalho é a importância da pesquisa de base considerando a característica multidisciplinar do componente estudado. Projetos assim são enriquecidos no quesito de oportunidades de escolha pelo investimento em melhorias nos processos de soldagem, de químicas de baterias e de materiais mais sofisticados. Com avanços em áreas inicialmente sem aplicações definidas como métodos de refrigeração não-convencionais ou materiais supercondutores, criam-se oportunidades de se construir baterias muito melhores e robustas.

Tendo dito isso, observa-se também o valor da pesquisa de mercado para a solução da melhor solução com a tecnologia atual. É interessante ressaltar que a pesquisa de células apontou uma solução comercial mais adequada do que a própria célula do Renault Zoe, fruto de uma parceria desenvolvida especificamente para uma aplicação. Este fato comprova que a melhor célula primária e a melhor química é aquela que providencia a configuração do acumulador que melhor se adequa aos requisitos. Ao invés de ser a célula com maior capacidade de descarga ou densidade energética. Certamente esses parâmetros são importantes mas é a interação entre esses e todos os outros que deve ser considerada.

A sugestão de trabalhos futuros está em desenvolver o projeto preliminar do conceito aqui definido, estudando em detalhes os componentes envolvidos nos tipos construtivos. São necessários também testes para validar as soluções propostas. O desenvolvimento de um acumulador necessita de bastante verificação. Não só já é conhecido que há uma variação grande na geometria e na performance de cada célula como, por se tratar de um projeto extremamente multidisciplinar, é possível que efeitos conflitantes passem despercebidos durante o projeto. Assim a verificação segue sendo a melhor garantia para determinar a qualidade.

Outro processo de validação necessário está no arrefecimento, explorando ferramentas de simulação multifísicas que permitam redução de custos de protótipos. Esta solução é uma em

que os cálculos analíticos vão apenas até certo ponto. Para de fato se determinar o ponto ótimo de operação são necessários estudos aprofundados enriquecidos com experimentos.

Espera-se que este estudo seja apenas o primeiro nessa linha de pesquisas em parceria entre o setor privado e a academia, gerando mais conhecimento e competitividade.

Por fim, se conclui que o modelo PRODIP se encaixa bem no projeto de sistemas automotivos, dando direcionamento e embasamento para as decisões ao longo do projeto em uma estrutura lógica e simples.

REFERÊNCIAS

- AIAG. **Advanced Product Quality Planning & Control Planning (APQP)**. [S.l.], 2008.
- AIAG. **About AIAG**. 2014. Disponível em: <https://www.aiag.org/about>.
- A.OLIVETTI, E. Lithium-ion battery supply chain considerations: Analysis of potential bottlenecks in critical metals. **Joule**, v. 1, n. 2, p. 229–243, 2017.
- ASHBY, M. F. On the engineering problems of materials. **Acta Metallurgica**, v. 37, p. 1273–1293, 1989.
- ASHBY, M. F. **Material Selection Charts**. 2002. Disponível em: http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/strength-cost/NS6Chart.html.
- BACK, N. et al. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri, SP: Editora Manole Ltda, 2008. ISBN 9788520422083.
- BOYLESTAD, R. L. **Introdução à análise de circuitos**. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2012. ISBN 9788564574205.
- CESAR, J. **Veja quais são os preços dos carros elétricos à venda no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://insideevs.uol.com.br/news/426568/precos-carros-eletricos-brasil/>.
- FLORIANI, B. L.; DIAS, A.; ROCHA, C. R. Aspectos metodológicos no projeto informacional e conceitual de um veículo remotamente operado subaquático. In: **VI Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia**. Maputo, Moçambique: [s.n.], 2011. Anais do VI Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. ISBN 9789728826246.
- GUO, J. et al. A concept selection method for designing climbing robots. **Key Engineering Materials**, v. 649, p. 22–29, 2015.
- MATSUBARA, V. **VW Brasil confirma que Amarok tem software para burlar emissões**. 2016. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/vw-brasil-confirma-que-amarok-tem-software-para-burlar-emissoes/>.
- MEAH, K.; HAKE, D.; WILKERSON, S. Design, build, and test drive a fsae electric vehicle. **The Journal of Engineering. The Institution of Engineering and Technology.**, v. 2020, p. 863–869, 2020.
- MILIANTE, C. M. Análise do efeito barocalórico em borracha natural através de simulações de dinâmica molecular. In: **Salão UFRGS 2019: SIC - XXXI Salão de iniciação científica da UFRGS**. Campus do Vale, RS: [s.n.], 2019.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte, MG: UFMG, 2009. ISBN 9788570417480.
- PANASONIC. **Datasheet NCR18650GA**. 2017. Disponível em: <https://www.orbtronic.com/content/Datasheet-specs-Sanyo-Panasonic-NCR18650GA-3500mah.pdf>.

PONS, V.; STANESCU, G. Materiais com mudança de fase: Análise de desempenho energético para o Brasil. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 8, p. 127–140, 2017.

PUGH, S. **Total Design**. [S.l.]: Addison-Wesley Publishing Company, 1991.

REINEMAN, S. **Design and Analysis of a Battery for a Formula Electric Car**. 2013.

REIS Ângelo Vieira dos. Sistematização das tarefas de valoração dos requisitos de cliente para uso no qfd. In: **II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**. João Pessoa, PE: [s.n.], 2002.

ROMANO, L. N. **Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

SAE. **SAE J670: Vehicle Dynamics Standards Committee. Vehicle Dynamics Terminology**. Warrendale, PA: [s.n.], 2008.

SAE. **History of Formula SAE...** 2010. Disponível em: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>.

SAE. **Formula SAE Rules 2020**. 2019. Disponível em: <http://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DownloadDocument.aspx?DocumentID=d9fa3638-59f8-411c-a487-e27abc2d9022>.

SUSANTO, D. **The Electrical Circuitry for Formula SAE-Electric 2012**. 2012.

WANG, Q. et al. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. **Journal of Power Sources**, v. 208, p. 210–224, 2012.

YIN, H. **Cooling and packaging of accumulators for Formula SAE car**. 2016.

ÇENGEL, Y.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa**. [S.l.]: McGraw Hill, 2008. ISBN 0073398128.

