



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS - CARAÚBAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LAYANE SILVA DE ARAÚJO

**ANÁLISE DE DETECÇÃO DE FALHA E ELABORAÇÃO DE PLANOS DE AÇÕES
PARA SISTEMA DE DIREÇÃO TIPO BAJA**

Caraúbas/RN
2023

LAYANE SILVA DE ARAÚJO

**ANÁLISE DE DETECÇÃO DE FALHA E ELABORAÇÃO DE PLANOS DE AÇÕES
PARA SISTEMA DE DIREÇÃO TIPO BAJA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Diego David Silva Diniz, Prof. Dr.

Caraúbas/RN
2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A658a Araujo, Layane Silva .
Análise de detecção de falha e elaboração de
planos de ações para Sistema de Direção tipo Baja /
Layane Silva Araujo. - 2023.
56 f. : il.

Orientador: Diego David Silva Diniz.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2023.

1. Sistema de Direção. 2. Pinhão e Cremalheira.
3. Ferramenta da Qualidade. 4. BAJA SAE. I.
Diniz, Diego David Silva, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

LAYANE SILVA DE ARAÚJO

**ANÁLISE DE DETECÇÃO DE FALHA E ELABORAÇÃO DE PLANOS DE AÇÕES
PARA SISTEMA DE DIREÇÃO TIPO BAJA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Defendida em: ____ / ____ / 2 ____.

BANCA EXAMINADORA

**DIEGO DAVID
SILVA DINIZ:**

Assinado digitalmente por DIEGO DAVID SILVA
DINIZ: [REDACTED]
DN: CN=DIEGO DAVID SILVA DINIZ, [REDACTED]
OU=UFERSA - Universidade Federal Rural Do
Semi-Árido, O=ICPEdu, C=BR
Razão: Eu estou aprovando este documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2023.05.25 13:24:13-03'00'
Foxit PhantomPDF Versão: 10.1.4

Diego David Silva Diniz, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente



DORGIVAL ALBERTINO DA SILVA JUNIOR
Data: 26/05/2023 19:29:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dorgival Albertino da Silva Júnior, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Assinado de forma digital
por JACKSON DE BRITO
SIMÕES: [REDACTED]
Dados: 2023.05.25
21:09:17 -03'00'

Jackson de Brito Simões, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

*Dedico esse trabalho ao meu pai Ângelo
Máximo de Araújo e minha mãe Marlene da
Silva.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço infinitamente a Deus e a todos os santos, por terem me dado forças e iluminado meu caminho durante toda a trajetória até aqui, me ajudando a viver um dia de cada vez.

Agradeço a mim mesma por nunca ter desistido, mesmo com todas as adversidades da vida e obstáculos, por ter tido força, fé e resiliência para contornar todas as dificuldades enfrentadas.

Agradeço aos meus pais e a minha irmã Laryssa por todo apoio e incentivo em todos os momentos.

Agradeço a Mylena, por todo zelo, carinho, amizade e compreensão durante não só o curso, mas a vida.

Agradeço a Ronaldo, por desde Angicos saber ser abrigo, amigo e irmão.

Agradeço aos meus amigos por tornarem meus dias mais leves, calmos e felizes, principalmente nos momentos de tristeza.

Agradeço ao meu orientador prof Dr Diego David Silva Diniz pela orientação, paciência e dedicação durante toda a realização desse trabalho.

Agradeço a toda banca examinadora pela disposição e atenção.

Agradeço a todo pessoal da Empresa Junior Engrenagem Jr, por todo aprendizado e companheirismo nessa jornada, em especial aos meus amigos Gean, Fernanda, Guilherme, Pablo e Geovanna.

Agradeço aos meus amigos da Equipe Caraubaja SAE, por me ajudarem durante todo o projeto, me auxiliando sempre que necessário, principalmente durante o trabalho da monografia, e por não serem só uma equipe e sim uma verdadeira família que levarei para sempre comigo, em especial aos meus amigos Ricelly Fernandes, Gabriel Silveira e Samuel Chaves.

Agradeço a minha dupla de amigos Bruna e Cássio que apesar de todos as desavenças e tempo não se afastaram, e sempre me ajudaram. E a Israel Praxedes, por todos os momentos seja de estudos como de apoio durante todo percurso de curso.

E por fim agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação pessoal e profissional até aqui.

“Quando eu contei os meus sonhos para alguém, me disseram: são grandes demais para você! Quando eu falei onde queria chegar, me disseram: Pare por aí, não vá além!” Mas com Deus foi bem diferente. Ele me disse: vai em frente eu contigo estou!”

(Leandro Borges)

RESUMO

Na indústria, muitos esforços são realizados na questão da análise dos produtos e de seus processos com a finalidade de torná-los mais eficientes e compatíveis com os anseios do mercado consumidor. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é analisar as falhas presentes em um sistema de direção de um veículo *off-road* do tipo BAJA SAE, promovendo e sugerindo diversos planos de ações, com a finalidade de melhorar seu desempenho. Para isso, foram considerados parâmetros iniciais definidos em conjunto com a equipe responsável pelo projeto. Em seguida, foram pesquisadas referências técnicas relevantes para estabelecer métodos que permitiam a detecção e obtenção dessas melhorias, como uso das ferramentas da qualidade que nortearam na elaboração de planos de ações. Com os dados obtidos foi possível analisar todas as causas raízes e determinar qual a melhor solução para cada uma, como, por exemplo, na ação de projetar um esbarro de latão no ambiente CAD e fabricar, no qual é usado na nova caixa de direção, permitindo que o problema do salto da engrenagem seja resolvido. Conclui-se que a metodologia desenvolvida no trabalho se mostrou eficiente, atendendo aos objetivos estabelecidos no escopo do projeto e apresentando bom desempenho nas situações que foram reproduzidas nas competições BAJA SAE Brasil.

Palavras-chave: Sistemas de direção; Caixa de direção; pinhão e cremalheira; BAJA SAE.

ABSTRACT

In the industry, many efforts are made to optimize products and their processes in order to make them more efficient and compatible with the wishes of the consumer market. Therefore, the objective of this work is to analyze the failures present in the steering system of a BAJA SAE off-road vehicle, promoting and suggesting several action plans, with the purpose of improving its performance. To do this, initial parameters defined together with the team responsible for the project were considered. Next, relevant technical references were researched to establish methods that allowed the detection and achievement of these improvements, such as the use of quality tools that guided the development of action plans. With the data obtained it was possible to analyze all the root causes and determine the best solution for each one, such as, for example, in the action of designing a brass wheel in the CAD environment and manufacturing, which is used in the new steering box, allowing the problem of gear jump to be solved. It is concluded that the methodology developed in the work proved to be efficient, meeting the objectives established in the project scope and presenting good performance in the situations that were reproduced in the BAJA SAE Brazil competitions.

Keywords: Steering systems; Steering box; rack and pinion; Baja SAE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trator de Artilharia de Nico	19
Figura 2 – Prova do Enduro, (Regional Nordeste) Camaçari-BA 2022	21
Figura 3 – Volante	22
Figura 4 – Vista Explodida da Caixa de Direção Manual.....	23
Figura 5 – Sistema de Direção Rolete e Sem-fim.....	24
Figura 6 – Bitola e Entre eixos.....	25
Figura 7 – Pino Mestre	26
Figura 8 – Caster	27
Figura 9 – Camber	27
Figura 10 – Geometria Ideal de Direção.....	28
Figura 11 – Ambiente de Montagem Inventor 2022.....	30
Figura 12 – Interface do Programa Trello	30
Figura 13 – Exemplo de um Diagrama FMEA	32
Figura 14 – Eventos da Árvore de Falhas	34
Figura 15 – Diagrama de Ishikawa	35
Figura 16 – Fluxograma de Atividades Desenvolvidas no Projeto.....	36
Figura 17 – Resultado do Diagrama de Ishikawa (Direção Pesada)	41
Figura 18 – Resultado do Diagrama de Ishikawa (Salto da Engrenagem)	41
Figura 19 – Gabarito da Nova Caixa de Direção	43
Figura 20 – Nova Caixa de Direção.....	43
Figura 21 – Processo Seletivo 2022.2	44
Figura 22 – Coifa de Direção	45
Figura 23 – Retentor.....	45
Figura 24 – Teste Nacional 2023.....	46
Figura 25 – Rolamento Linear	47
Figura 26 – Demonstração da Interface do Trello	48
Figura 27 – Vista explodida da antiga Caixa de Direção	50
Figura 28 – Vista Explodida da nova Caixa de Direção sem Esbarro	50
Figura 29 – Vista explodida da nova Caixa de Direção com Esbarro	51
Figura 30 – Esbarro de Latão e Parafusos	51
Figura 31 – Nova Caixa com Esbarro.....	52
Figura 32 – Sistema de Direção Protótipo XSI	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Componentes de uma Caixa de Direção Manual.....	25
Quadro 2 – Pontuação de Ocorrência para Diagrama FMEA.....	32
Quadro 3 – Pontuação de Severidade para Diagrama FMEA	33
Quadro 4 – Pontuação de Detecção para Diagrama FMEA	33
Quadro 5 – Legenda do NPR	40
Quadro 6 – Plano de Ação (Direção Pesada).....	42
Quadro 7 – Checklist Pneus	46
Quadro 8 – Plano de Ação (Salto da Engrenagem)	48
Quadro 9 – Exemplo de Plano de Manutenção Preventiva	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de dados do veículo XSI.....	37
Tabela 2 – Resultado do Diagrama de FMEA	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CG	Centro de Gravidade
NPR	Número de Prioridade de Risco
POP	Procedimento Operacional Padrão
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
SAE	Society of Automotive Engineers - Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade
XSI	Veículo <i>off road</i> com Salto Inesperado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivos Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Histórico do Automóvel	19
2.2 Programa BAJA SAE	20
2.3 Sistemas de Direção (Tipos de Sistemas de Direção e Componentes).....	21
2.3.1 Tipos de Sistema de Direção.....	22
2.3.1.1 Sistema de Direção Pinhão Cremalheira	22
2.3.1.2 Sistema de Direção de Rolete e Sem-fim.....	23
2.4 Projeto Caixa de Direção	24
2.5 Parâmetros de Projeto de Sistema de Direção	25
2.5.1 Bitola e Entre Eixos	25
2.5.2 Pino Mestre	26
2.5.3 Caster	26
2.5.4 Camber.....	27
2.6 Geometria Ackerman	27
2.7 Ferramentas de Projetos	29
2.7.1 Autodesk Inventor.....	29
2.7.2 Trello	30
2.7.3 FMEA (Análise do Modo de Falha e seus Efeitos)	30
2.7.4 FTA (Análise da Árvore de Falhas)	33
2.7.5 Diagrama de Ishikawa	34
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	36
3.1 Objeto de estudo – SISTEMA DE DIREÇÃO	36
3.2 Caracterização dos Pontos a Serem Analisados	37
3.3 Metodologia Adotada para os Planos de Ação	38
4 RESULTADO E DISCUSSÃO	39
4.1 Detecção dos Problemas a Serem Analisados no Sistema de Direção.....	39
4.1.1 Aplicação do FMEA	39

4.1.2 Diagrama de Ishikawa	40
4.2 Planos de Ações	42
4.2.1 Plano de Ações para Direção Pesada	42
4.2.2 Planos de Ações para Salto da Engrenagem	48
4.2.2.1 Planejar Planos de Manutenção Preventivas e Alteração no Projeto da Caixa de Direção	49
4.2.2.1.1 Planejar Planos de Manutenção Preventivas	49
4.2.2.1.2 – Alteração no Projeto da Caixa de Direção	49
5 CONCLUSÃO	53
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXO A – CHECKLIST DE PERGUNTAS ANTES E APÓS AS COMPETIÇÕES	56

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos meios de transportes foi de grande importância para evolução da humanidade, sendo esses utilizados para deslocamento de pessoas e de mercadorias. No passado, o homem se locomovia apenas caminhando, percorrendo grandes distâncias para procurar alimentos e abrigo. Mas a medida que o tempo passava, aumentava a procura por melhorias que facilitariam sua vida, sendo assim, os transportes passaram a ser por meio de animais, até chegarem a hoje, o automóvel.

Os transportes evoluíram, principalmente, durante a Revolução Industrial. Inicialmente, a maioria das invenções estava restrita apenas a Inglaterra, mas com a 2ª Revolução Industrial, foi possível alcançar outros países. No início do século XX, os Estados Unidos começaram a produzir carros padronizados em massa, quando Henry Ford deu origem ao Fordismo, que tinha como objetivo o aumento da produtividade e a diminuição dos custos de produção. Nos dias de hoje, o carro passou a ter ainda mais utilidade, devido as grandes necessidades de se locomover a grandes distâncias, como também por ser um objetivo de valor e desejo para muitos.

O automotor possui diversos subsistemas responsáveis em desempenhar determinadas ações distintas, como por exemplo o sistema de direção que tem como principal função conduzir o veículo com segurança dentro da rota desejada e com o mínimo de esforço por parte do motorista. Segundo Almeida (2016), esse comportamento é conseguido por diferentes formas, no que se refere ao nível de esforço, ângulo do volante, sensibilidade da pista pelo condutor e comportamentos diferentes que são influenciados pela velocidade do veículo e outros fatores externos.

Com o surgimento do automobilismo, várias competições foram criadas. Entre elas, tem-se os programas desenvolvidos no Brasil pela Sociedade de Engenheiros da Mobilidade (B), onde pode-se destacar o projeto BAJA SAE, além de possuir programas como o Aerodesing, Fórmula, H2 Challenge e o mais recente o Fórmula Drone.

O programa BAJA SAE é uma competição que ocorre entre instituições de ensino superior de todo o país, nela cada equipe deve idealizar, projetar, fabricar e testar um veículo *off-road* (fora de estrada). Com isso, surge a oportunidade de trabalhar em equipe e executar os conhecimentos aprendidos em sala de aula como, elaborar, dimensionar, simular, fabricar, montar e testar um projeto mecânico de grande complexidade.

O presente trabalho visa levantar um estudo detalhado no projeto do sistema de direção do protótipo do veículo *off-road*, desenvolvido pela equipe Caraubaja SAE na

UFERSA – Campus Caraúbas, visando aplicar melhorias com o propósito de aumentar a eficiência da mesma. Para tal, essas ações foram baseadas de acordo com as restrições impostas pelo Regulamento Administrativo e Técnico BAJA SAE Brasil, assim como em problemas ocorridos em competições passadas. Além disso, a equipe Caraubaja pretende conseguir chegar ao top 10 da competição BAJA nacional e para isso o subsistema de direção precisa ter uma otimização estrutural e dinâmico de modo que possibilite condições de serem alcançadas tais requisitos traçados pela equipe.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com intuito de atingir as premissas do projeto Caraubaja, o trabalho tem como propósito entender e conhecer os parâmetros usados no sistema de direção de um veículo tipo BAJA. Durante isto, será possível utilizar os conhecimentos aprendidos em sala de aula, colocando em prática o que é aprendido na teoria. Os conhecimentos e resultados encontrados neste trabalho serão aplicados ao veículo BAJA da UFERSA, campus Caraúbas.

Desta maneira, será realizado um estudo mais aprofundado do projeto, visando em solucionar problemas encontrados no sistema de direção durante nas competições, além de obter melhorias em conforto. Outro fator de escolha é a possibilidade de contribuir em projetos futuros, seja pela metodologia e modelos desenvolvidos, como pela determinação de alguns efeitos nos parâmetros da direção.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Geral

O objetivo deste trabalho é analisar as falhas presentes em um sistema de direção de um veículo *off-road* do tipo BAJA SAE, promovendo e sugerindo diversos planos de ações, com a finalidade de melhorar seu desempenho.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar levantamento bibliográfico sobre sistemas de direção veicular;
- Aplicar ferramentas da qualidade para análise de falhas.
- Identificar as principais causas raízes;

- Elaborar planos de ações com base nas ferramentas;
- Solucionar as possíveis falhas encontradas nas ferramentas da qualidade, através dos planos de ações do sistema de direção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Histórico do Automóvel

Segundo Oliveira (2010), a necessidade de se locomover da espécie humana era essencial para a sua sobrevivência e ainda continua sendo, mas de uma maneira bem diferente, pois naquela época o homem precisava se locomover em busca de alimento e fugir de predadores. A primeira forma de locomoção começou usando as pernas, logo, em seguida, por ser limitado introduziu a tração animal, pois eram mais rápidos e suportavam mais cargas. Ao longo da evolução foi possível surgir novas formas de locomoção como as carroças, barcos e o automóvel, como hoje é conhecido.

O automóvel não possui um exato momento de criação, assim como a humanidade. A sua evolução surgiu entre os séculos XVIII e XIX, a partir de avanços tecnológicos, possibilitando que os veículos conseguissem atingir velocidades maiores em um curto período de tempo, de maneira confortável, segura e agradável para o motorista e seus passageiros.

O provável primeiro veículo movido à propulsão a vapor foi criado por Nicolas Cugnot, na França, por volta de 1769 (AUTOMOBILÍSTICA, 2009), mostrado na Figura 1. No entanto, não ultrapassava uma velocidade de 5 a 6 km/h, por isso muitos não o consideram como o criador do automóvel, devido seu motor ser a vapor e não ter aparência de automóvel. Anos depois, os construtores inovaram e surgiram os veículos elétricos movidos a baterias, sendo eles mais silenciosos e rápidos, porém não conseguiam percorrer grandes distâncias por causa da necessidade de recarregar as baterias.

Figura 1 – Trator de Artilharia de Nico



Fonte: Carro antigo (2016)

Segundo Almeida (2016), o motor de combustão interna com quatro tempos foi usado pela primeira vez em 1876, o qual foi inventado pelo engenheiro alemão Conde

Nikolaus Otto. Associando a invenção do motor a combustão interna, o surgimento da gasolina propiciou a criação do primeiro carro com motor a combustão interna que segundo Oliveira (2010) foi feito por Karl Friedrich Benz em 1885, que é considerado o pai do automóvel. Logo depois, deu início a produção em massa do Motorwagen que consistia no seu primeiro carro, como consequência disso, foi considerada a primeira linha de montagem e a maior do mundo do começo do século XX.

A evolução dos automóveis acentuou-se depois da Segunda Guerra Mundial, os fabricantes investiram em uma produção mais barata e em série, com intuito de ter uma linha de montagem rápida. De acordo com Almeida (2016), os que tomaram a dianteira nessa investida foram Henry Ford, na América do Norte, e Willian Morris, na Inglaterra, eles fabricaram exemplares como o Ford, o Morris e o Austin.

2.2 Programa BAJA SAE

Face ao processo de globalização, executivos dos segmentos automotivo e aeroespacial conscientes da necessidade de abrir as fronteiras do conhecimento para os profissionais brasileiros de mobilidade, tiveram a iniciativa de criar, no Brasil, uma afiliada da SAE Internacional (SAE BRASIL, 2023).

O Programa o BAJA SAE, se caracteriza como:

(...) um desafio lançado aos estudantes de Engenharia que oferece a chance de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, visando incrementar sua preparação para o mercado de trabalho. Ao participar do programa Baja SAE, o aluno se envolve com um caso real de desenvolvimento de um veículo off road, desde sua concepção, projeto detalhado, construção e testes. (SAE BRASIL, 2023a).

As competições BAJA SAE são parte do programa, que desenvolve o conhecimento técnico/científico dos estudantes universitários do Brasil, promovendo uma competição onde cada aluno da instituição deve se unir para formar uma equipe multidisciplinar que promove ações que contemple os desafios lançados pela SAE Brasil. A competição consiste na entrega de um relatório técnico, onde constam todas as informações do veículo; uma apresentação do projeto, no qual é levado em conta as tomadas de decisões e o pensamento empreendedor de cada equipe; uma avaliação prévia de segurança, onde é verificado se todos os requisitos do regulamento estão sendo cumpridos e se o protótipo é seguro para o piloto e equipe técnica; avaliações dinâmicas, em que é testado cada subsistema afim de verificar a qualidade da manufatura e o desempenho e se encerra com a prova de enduro que é uma prova

composta por um percurso com os mais diversos obstáculos e mudanças de terreno (lama, terra e pedras, por exemplo). Esta prova é uma corrida em que quem ganha não é o primeiro a cruzar a linha de chegada e sim a equipe que conseguir dar o maior número de voltas na pista. Na Figura 2 é possível observar o protótipo XSI da equipe Caraubaja SAE, na etapa nordeste 2022 da competição BAJA SAE.

Figura 2 – Prova do Enduro, (Regional Nordeste) Camaçari-BA 2022



Fonte: BAJA SAE

Portanto, o projeto é um programa de extrema relevância para a formação dos futuros engenheiros, pois os participantes se comportam ainda na graduação como profissionais, cumprindo todas as regras, planejamentos, além de também exercer relações interpessoais uns com os outros.

2.3 Sistemas de Direção (Tipos de Sistemas de Direção e Componentes)

O sistema de direção de um veículo é responsável por transmitir o movimento do volante para as rodas através de um conjunto de peças articuladas e, assim, possibilitar o alinhamento das rodas com o veículo, garantindo a sua dirigibilidade.

Conforme Gillespie (1992), o sistema de direção dos veículos automotores possui grande importância no comportamento estático e dinâmico. Os ângulos que são gerados nas rodas a partir do comando do condutor são chamados ângulos de esterçamento. Entretanto, os ângulos de esterçamento satisfatórios são modificados pela geometria de suspensão e direção.

Os principais componentes do sistema de direção são as rodas dianteiras pivotantes, caixa de direção, coluna, mangas de eixo e volante, o componente mais

conhecido, que transmite os comandos do motorista para as rodas. Para promover o esterçamento das rodas, conforme a vontade do motorista, é necessária a aplicação de uma força resultante ao volante, de modo que este realize movimentos de rotação em torno do seu centro. Esse componente pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Volante



Fonte: Fernandes (2005)

2.3.1 Tipos de Sistema de Direção

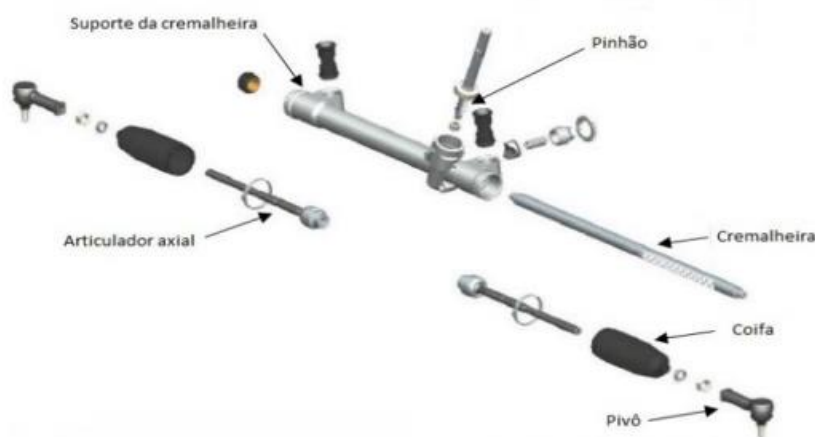
Segundo Almeida (2016), o sistema de direção é dividido em duas famílias, que são: pinhão-cremalheira e o sistema de rolete e sem-fim. O volante é conectado ao mecanismo de direção através do sistema de coluna de direção que é composto de eixos, mancais, juntas universais e isoladores de ruído e de vibrações em algumas aplicações. Através desta conexão, o mecanismo de direção é acionado e transforma o movimento de rotação do volante em ângulos de esterçamento das rodas. A transformação do ângulo do volante para o ângulo nas rodas é realizada de maneiras diferenciadas, a partir das duas concepções de sistemas de direção anteriormente citadas.

2.3.1.1 Sistema de Direção Pinhão Cremalheira

Esse sistema de direção é usado em carros de passeio e veículos comercial leves, normalmente fixado na carroceria do veículo, podendo ser posicionado antes do eixo das rodas, como atrás delas. O sistema de direção pinhão cremalheira é o mais simples e possui menos elementos quando comparado a outros. Para Fernandes (2005) é através

do engrenamento pinhão e cremalheira, o movimento de rotação do volante que resulta no mesmo movimento de rotação do pinhão é transformado em movimento de translação da cremalheira. Nas extremidades da cremalheira existem barras articuladas que são conhecidas como braço de direção, que tem como função transmitir o movimento da cremalheira até as mangas de eixo, gerando assim ângulos de esterçamento nas rodas. O pinhão está acoplado a caixa de direção, e é unido na coluna de direção através de um eixo, que transmite o movimento de rotação do volante para a cremalheira, como visto na Figura 4.

Figura 4 – Vista Explodida da Caixa de Direção Manual



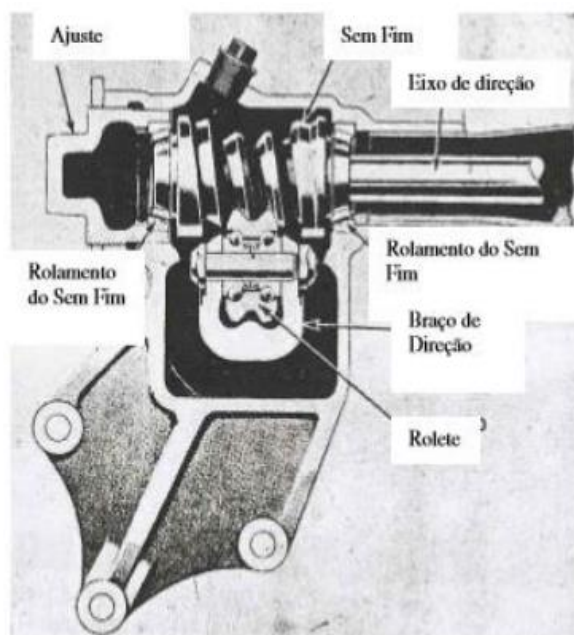
Fonte: Almeida 2016, Apud, Manual do Eixo Dianteiro 2016

2.3.1.2 Sistema de Direção de Rolete e Sem-fim

O sistema de direção Rolete e Sem-Fim é um usado em veículos de médio e grande porte o qual é composto por um eixo de entrada acoplado ao volante e ao sem-fim. Esse último componente tem sua geometria parecida com a de um parafuso, onde o seu movimento angular gerado causa um deslocamento linear no ponto de engrenamento, que causará um movimento angular do componente chamado de setor dentado. Esse componente fica acoplado ao eixo de saída. Então com a rotação do sem-fim e o engrenamento do setor dentado ocorre o deslocamento angular do eixo de saída, que está conectado ao braço de direção ("Braço de Pitman"). Acoplados ao braço, estão os as barras de direção que tem por função transmitir o movimento do eixo de saída para as mangas de eixo fixadas nas rodas, fazendo assim com que as mesmas esterquem. Entre o sistema pinhão e cremalheira e o rolete e sem-fim, de acordo com Gillespie

(1992), observa-se uma maior aplicação do sistema pinhão e cremalheira por ter menor nível de complexidade, facilidade em fixação e a não obrigatoriedade de longarinas, a Figura 5 mostra o sistema de Direção Rolete e Sem-fim.

Figura 5 – Sistema de Direção Rolete e Sem-fim



Fonte: Crouse 1960

2.4 Projeto Caixa de Direção

A caixa de direção é comumente fixada na carroceria ou na suspensão, podendo ser localizada tanto na frente do eixo dianteiro ou atrás. O movimento de rotação do volante é transmitido para o pinhão que transforma o movimento de rotação em movimento de translação da cremalheira. Nas extremidades da cremalheira existem barras biarticuladas, conhecidas por braço de direção, que tem a função de transmitir a união da cremalheira com as mangas de eixo.

Sendo usada em veículos de passeios, pois é de fácil manutenção, leve, confiável, seguro, com montagem rápida, fabricação simples e baixo custo, eficiente e possui boa regulagem, além de ser muito comum nos veículos do tipo BAJA SAE. A característica desse sistema é a redução do torque no volante necessário para girar as rodas dos veículos, através da redução de engrenagem e geometria do sistema. A seguir a Quadro 1 mostra todos os componentes do projeto de uma caixa de direção.

Quadro 1 – Componentes de uma caixa de Direção Manual

1. Carcaça	11. Tirante Interno
2. Rolamento ou Bucha	12. Anel “O”
3. Bucha da Cremalheira	13. Sanfona de Vedação
4. Cremalheira	14. Abraçadeira Maior
5. Conjunto Pinhão	15. Abraçadeira Menor
6. Tampão do Pinhão	16. Silente Block
7. Vedador do Pinhão	17. Porca do Tirante Interno
8. Yoke	18. Tirante Externo
9. Mola	19. Tirante Externo
10. Tampa do Yoke	

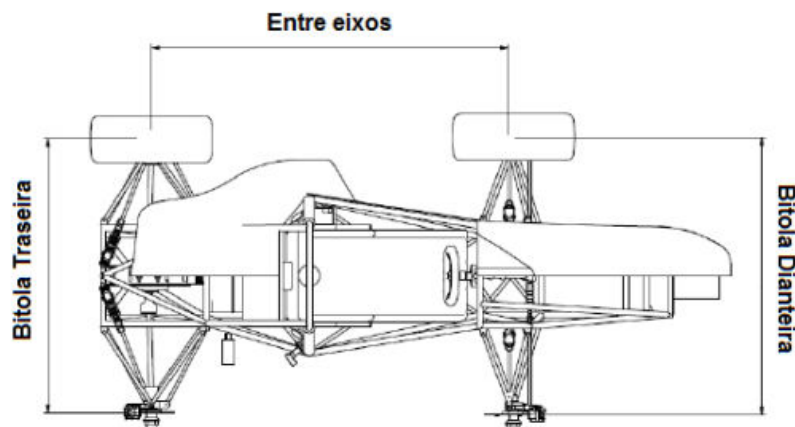
Fonte: Fernandes (2005)

2.5 Parâmetros de Projeto de Sistema de Direção

2.5.1 Bitola e Entre Eixos

A bitola é definida como a distância entre os centros das rodas em um mesmo eixo no veículo. Uma bitola muito elevada aumenta a estabilidade do veículo em manobras mas diminui o desempenho em curvas mais fechadas, por outro lado, uma bitola pequena aumenta a performance do veículo em curvas mas pode afetar a estabilidade em momentos de muita aceleração lateral. Segundo Almeida (2016), a distância entre os eixos é a extensão entre os centros das rodas dianteira e traseira, normalmente, quanto maior a distância entre os eixos, maior será dificuldade para fazer curvas, fazendo também com que a estabilidade lateral do veículo fique menor. A Figura 6 ilustra a bitola dianteira e a traseira.

Figura 6 – Bitola e Entre eixos

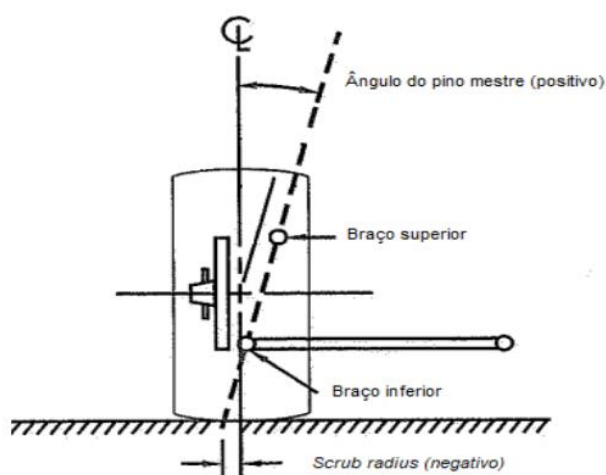


Fonte: Bravo (2013)

2.5.2 Pino Mestre

O pino mestre é um eixo formado entre as fixações dos braços de suspensão. Este eixo vai ser o eixo de movimentação da roda do veículo e sua disposição está completamente ligada à performance da direção do veículo. Conforme Fernandes (2005), na maioria das aplicações, este eixo possui uma inclinação, convergente para o centro do veículo, que é chamada inclinação do pino mestre. Essa inclinação é dada como sendo o ângulo existente entre o pino mestre e um plano que passa no centro da roda. A Figura 7 exemplifica o pino mestre.

Figura 7 – Pino Mestre

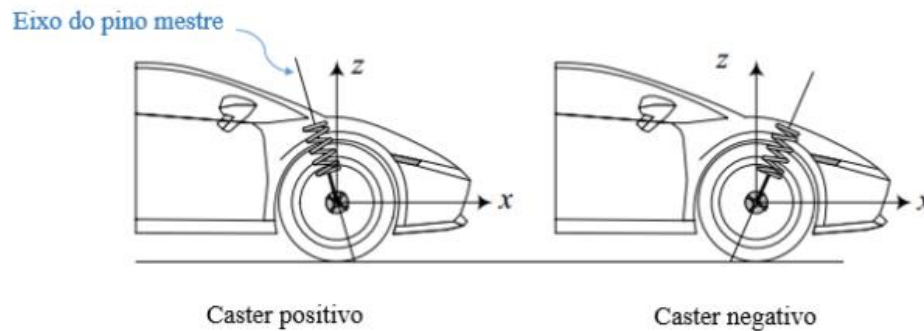


Fonte: Milliken, adaptado de Milliken and Milliken (1995)

2.5.3 Caster

Segundo Diniz (2014), Caster é o ângulo, na vista lateral, entre o eixo do pino mestre – na suspensão duplo A é uma linha imaginária determinada pelos pontos da articulação das bandejas superior e inferior com a montante – e o eixo vertical do veículo. Este ângulo é dividido em três condições: pode ser positivo quando a parte superior do pino mestre está inclinada para a parte traseira do veículo, negativa quando a parte superior do pino mestre está inclinada para a parte dianteira do veículo e, por fim, nula quando o pino mestre estiver alinhado com a vertical, a Figura 8 exemplifica.

Figura 8 – Caster

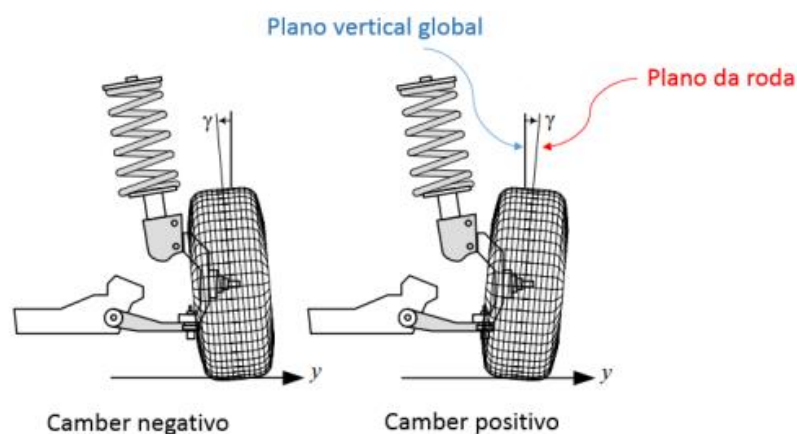


Fonte: Diniz (2014)

2.5.4 Camber

De acordo com Cervo (2017), o ângulo de camber ou cambagem, é o ângulo entre o plano médio e a vertical medido a partir da vista frontal do veículo. Este ângulo pode ser considerado como: positivo quando a parte superior da roda se inclina com o afastamento do chassi, negativo quando a inclinação for para dentro e nulo quando o ângulo entre o plano médio da roda e a vertical é igual a 0° , como mostrado na Figura 9. Desse modo, o ajuste desse parâmetro dará a possibilidade de variar características de rolamento das rodas.

Figura 9 – Camber



Fonte: Diniz (2014)

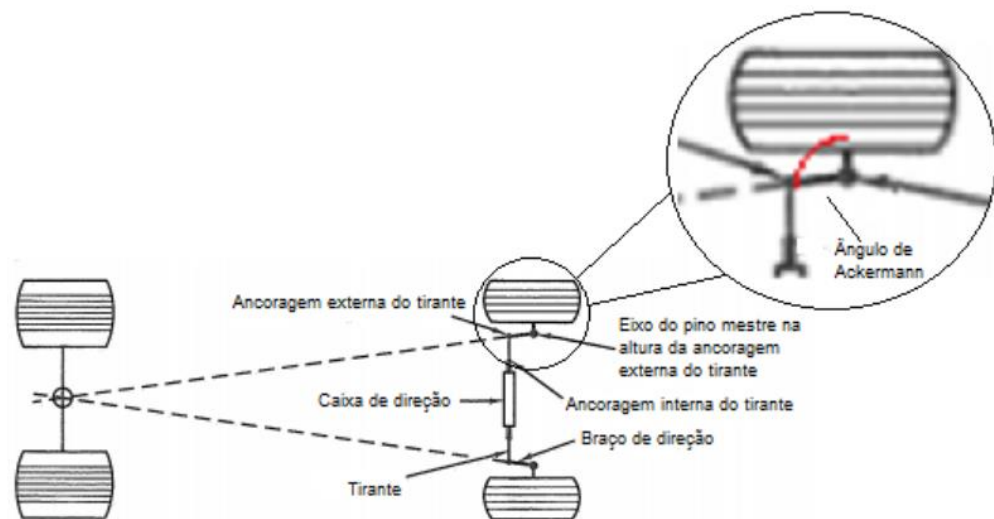
2.6 Geometria Ackerman

De acordo com Gillespie (1992), os movimentos laterais transmitidos pelos mecanismos de direção através de barramentos às rodas direita e esquerda possuem uma importante característica geométrica. Para que ambas as rodas diretrizes sigam a

trajetória desejada, as quatro rodas devem ter uma orientação em que os seus raios coincidam num só ponto, chamado centro instantâneo de rotação, situado no prolongamento do eixo das rodas traseiras. Onde a roda interna tem um maior ângulo de esterçamento que a externa.

A geometria Ackerman é ideal para o sistema de direção de um veículo, pois possui um mecanismo quatro barras na forma de um trapézio, o que faz com que esse arranjo geométrico tenha o efeito de um ângulo maior na roda interna a curva, além da roda externa ter uma velocidade relativamente maior, como visto na Figura 10.

Figura 10 – Geometria Ideal de Direção



Fonte: Adaptado de Milliken; Milliken (1995)

Para Gillespie (1992), o cálculo dos ângulos interno e externo de esterçamento das rodas que atendam a geometria de “Ackerman” podem ser aproximados conforme as seguintes equações (1) e (2):

$$\delta_o = \tan^{-1} \frac{L}{R + \frac{t}{2}} \quad (1)$$

$$\delta_i = \tan^{-1} \frac{L}{R - \frac{t}{2}} \quad (2)$$

Onde,

δ_0 e δ_i = Ângulo de esterçamento externo e interno das rodas, respectivamente;

L = Entre eixo (distância entre os eixos que passam no centro das rodas dianteiras e traseira em uma vista lateral);

t = Bitola do eixo (distância de centro a centro das rodas em uma vista frontal ou traseira do veículo);

R = Raio da curva de giro.

Segundo Cervo (2017), este tipo de geometria é indicado para veículos que não desenvolvam altas velocidades, como por exemplos carros de passeio, pois suas rodas descrevem a trajetória da curva e não tendem a escorregar sem a presença de forças laterais. Portanto hoje é a geometria mais utilizada em veículos de passeio e de baixa potência.

2.7 Ferramentas de Projetos

As ferramentas da qualidade são um conjunto de soluções projetadas para organizar as tarefas de um projeto. O seu principal objetivo é definir, medir, analisar e resolver problemas que impactam as organizações. Desse modo, algumas ferramentas de projeto e qualidade serão utilizadas no trabalho, para melhorar os processos, identificando as falhas.

2.7.1 Autodesk Inventor

O *software Inventor* é usado para modelagens em três dimensões (3D), criado e desenvolvido pela empresa Autodesk. Esse *software* possibilita além da modelagem, simulações, para que os protótipos desenvolvidos nele sejam funcionais. Nesse trabalho será usado o Autodesk Inventor 2023 versão estudante que permite também avaliar o comportamento mecânico dos sistemas desenhados, por meio de simulações, além de mostrar as deformações dos objetos e os dados físicos envolvidos. A Figura 11 mostra o ambiente de Montagem.

Figura 11 – Ambiente de Montagem Inventor 2022



Fonte: Equipe Caraubaja SAE (2022)

2.7.2 Trello

O Trello é uma ferramenta de projeto visual gratuita e *on-line*, conforme ilustrado na Figura 12, que possibilita o gerenciamento de qualquer tipo de projeto, fluxo de trabalho ou monitoramento de tarefas. Pode-se adicionar upload de arquivos multimídia e etiquetas coloridas para ajudar o planejamento das atividades por ordem de importância com cores que auxilia visualmente os próximos prazos. O Trello irá auxiliar com o planejamento de todas as atividades durante o tempo de desenvolvimento da pesquisa, além de ser uma ferramenta simples para manter as tarefas organizadas.

Figura 12 – Interface do Programa Trello



Fonte: Autoria Própria

2.7.3 FMEA (Análise do Modo de Falha e Seus Efeitos)

O FMEA consiste em uma metodologia analítica, na qual se avalia as falhas e as que possam vir a surgir durante a evolução de um processo ou projeto. Essa ferramenta

apresenta as seguintes vantagens: diminuição de custo; aumento da confiabilidade de produtos; implementação de melhorias baseadas em dados; catalogação das informações sobre as falhas; documentação das falhas; suas causas e a obtenção de um NPR (Número de Prioridade de Risco) para cada falha (IQA, 2008).

Além dessas vantagens citadas, o FMEA é utilizado na indústria automotiva, já que possui um caráter obrigatório regulamentado pela norma QS-9000. Trata-se de uma norma criada para o setor automotivo e seus fornecedores pelas principais montadoras da década de 90 nos Estados Unidos, tais como a Ford, GM e Chrysler. Esta norma é responsável por definir parâmetros da qualidade dos produtos das três montadoras e seus fornecedores (HECKERT *et al*, 1998).

O FMEA pode ter vários tipos de aplicações, porém Carlson (2012) define apenas três tipos como sendo usados os mais comuns, o de sistema, de processo e o de projeto descritos abaixo:

➤ FMEA de sistemas: Pode ser definido como o nível mais alto de análise a ser realizada, avaliando vários subsistemas, no qual o foco principal são as falhas relacionadas à segurança, interface e integração entre eles, e aquelas que impossibilitem o sistema de operar corretamente. Este tipo de análise avalia as interfaces e a integração de maneira ampla, ao invés de considerar apenas falhas singulares.

➤ FMEA de processo: o foco desta ferramenta se encontra na análise dos processos na cadeia produtiva de um produto, como a fabricação deste ou sua montagem, o escopo dessa ferramenta frequentemente inclui processos de manutenção, transporte de peças, operações e os processos já citados anteriormente como manufatura e montagem.

➤ FMEA de projeto ou D-FMEA: é aquele que está focado no estudo do design do produto, fazendo a análise no projeto de componentes dando uma ênfase maior no uso confiável do produto. O objetivo deste FMEA é analisar as falhas em um produto ou as que possam ser originadas durante a etapa de projeto.

Perguntas básicas a serem feitas para a construção de uma FMEA:

- De que maneiras um componente pode falhar?
- Que tipos de falhas são observados?
- Que partes do sistema são afetadas;
- Quais são os efeitos da falha sobre o sistema?
- Qual a importância da falha?

- Como preveni-la?

Assim, para um melhor entendimento da realização do diagrama FMEA segue abaixo um exemplo prático na figura 13 de como aplicar em um estudo de caso.

Figura 13 – Exemplo de um Diagrama FMEA

ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA POTENCIAL

Nº. FMEA: 122

Área: Resfriamento de Cubas

Sistema: Bombeamento

Data de Início: 27-08-2012

Revisão: 01

Equipe: João, Felipe, Pedro

Responsável: Cristiano

Preparado por: João

Telefone: (15) 3021-6257

Citisystems

Nome do Componente	Função do componente	Modo(s) de falha	Efeito(s) Potencial(is) de Falha(s)	OCORR (tab1) (O)	SEVER (tab2) (S)	DETEC (tab3) (D)	RISCO (RPN) (O)*(S)*(D)	Ação Corretiva Recomendada
M212 - Motor Elétrico	Bombear água para a caixa d'água central	Estator - Falha de isolamento	Perda de Fluxo	1	3	5	15	
		Estator - Enrolamento danificado	Perda de Fluxo	4	4	6	96	Realizar inspeção mensalmente no estator
		Estator - Rotor Queimado	Perda de Fluxo	4	4	5	80	Realizar termografia mensalmente
		Estator - Vibração Excessiva	Perda de Fluxo	5	6	5	150	Realizar análise de vibração mensalmente
		Estator - Rolamento Travado	Perda de Fluxo	5	6	6	180	Realizar inspeção semanal no rolamento

Fonte: www.citisystems.com.br

Geralmente, utiliza-se escalas de critérios de 1 a 10 para hierarquizar os índices analisados pelo FMEA, como mostrado nos Quadros 2, 3 e 4.

Quadro 2 – Pontuação de Ocorrência para Diagrama FMEA

OCORRÊNCIA (O): QUAL A FREQUÊNCIA?	
PESO	CRITÉRIO
1	Chance remota
2	Frequência muito baixa
3	Pouco frequente
4	Frequência baixa
5	Frequência ocasional
6	Frequência moderada
7	Frequente
8	Frequência elevada
9	Frequência muito elevada
10	Frequência máxima

Fonte: Autoria Própria

Quadro 3 – Pontuação de Severidade para Diagrama FMEA

SEVERIDADE (S): O QUÃO RUIM É O PROBLEMA?	
PESO	CRITÉRIO
1	Efeito não detectável no sistema
2	Baixa severidade: Causando leve dano material
3	Severidade moderada: Cliente hora insatisfeito com danos materiais moderado
4	
5	
6	
7	Severidade alta: Alta insatisfação do cliente
8	
9	Severidade muito alta: Risco potencial de segurança e 10 problemas graves de não-conformidades
10	

Fonte: Autoria Própria

Quadro 4 – Pontuação de Detecção para Diagrama FMEA

DETECÇÃO (D): O CLIENTE PODE VER O PROBLEMA?	
PESO	CRITÉRIO
1	Detecção quase certa do modo de falha
2	Probabilidade muito alta do modo de falha
3	Alta probabilidade de detecção do modo de falha
4	Moderadamente alta probabilidade de detecção do modo de falha
5	Moderada probabilidade de detecção do modo de falha
6	Baixa probabilidade de detecção do modo de falha
7	Probabilidade muito baixa de detecção do modo de falha
8	Probabilidade remota de detecção do modo de falha
9	Probabilidade remota de detecção do modo de falha
10	Não é possível detectar o modo de falha

Fonte: Autoria Própria

2.7.4 FTA (Análise da Árvore de Falhas)

A FTA trabalha a partir de uma falha, de maneira que seja capaz de encontrar as causas do problema. Sendo possível realizar um maior detalhamento de cada falha e suas origens, deixando o número de prioridade de risco obtido no FMEA mais preciso (LIMA *et al*, 2006). É uma técnica de confiabilidade que tem como os principais objetivos: identificar todas as combinações de causas que podem dar origem a um evento indesejado, que fica alocado no topo da árvore de falha; estudar a probabilidade de ocorrência dessas causas, dessa forma, verificar a probabilidade do evento de topo;

priorizar ações que visam impedir que essas causas ocorram e resultem no evento indesejado (FOGLIATTO e DUARTE, 2011).

A análise é feita de forma gráfica, no qual há uma sequência lógica conectada, que poderá mostrar a origem da causa para uma falha, em que a análise tem como ponto de partida um evento indesejado, seja uma falha ou um mau funcionamento, chamado de evento de topo. Deste evento são definidos todos os meios para sua ocorrência. Portanto, pode-se dizer que a partir de um evento de topo são estabelecidos os eventos de níveis inferiores que são, sozinhos ou combinados (no qual os eventos mais altos da árvore são os outputs, as falhas principais e os eventos mais baixos os inputs) os geradores do efeito indesejado (ROZENFELD et al., 2006).

A organização da árvore de falhas utiliza uma simbologia específica, como apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Eventos da Árvore de Falhas

	Retângulo	Evento que resulta da combinação de vários eventos básicos. Pode ser mais desenvolvidos.
	Círculo	Evento/falta básica, que não requer maiores desenvolvimentos
	Casa	Um evento básico esperado de ocorrer em condições normais de operação
	Diamante	Como o retângulo, mas não há interesse ou não é possível desenvolvê-lo mais
	Triângulo	Símbolo de transferência

Fonte: Adaptado de Fogliatto e Duarte (2011)

2.7.5 Diagrama de Ishikawa

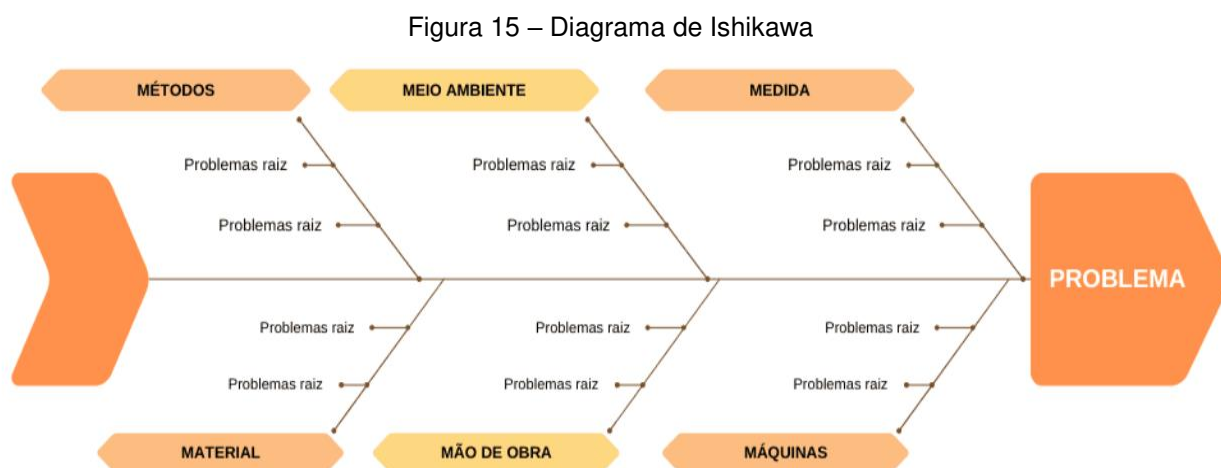
O diagrama de Ishikawa, também é conhecido como Diagrama de Espinha de Peixe ou Diagrama de Causa e Efeito, foi proposto por Kaoru Ishikawa na década de 60. É uma ferramenta da qualidade que busca as causas de um problema, analisando todos os possíveis fatores que envolvem a execução do processo. Para Werkema (1995), o diagrama de causa e efeito se configura como sendo uma ferramenta utilizada para apresentar a relação existente entre um resultado de um processo, que no caso referia-

se ao efeito e os fatores que possam ter modificado o resultado do processo considerado. Na metodologia, todo problema tem causas específicas, e essas causas devem ser analisadas e testadas, uma a uma, a fim de comprovar qual delas está realmente causando o efeito (problema) que se quer eliminar. Eliminado as causas, elimina-se o problema.

De acordo com Medeiros (2016), a construção do diagrama começa com a definição do problema, em que devesse evitar a princípio ser genérico nessa etapa, preferindo definir o problema de forma objetiva e em termos de qualidade que possa ser estimável. A seguir o passo a passo da criação:

- Criação da estrutura do diagrama, no qual é feito um traço na horizontal, marcando a direita deste traço o problema que foi definido, e em perpendicular a este traço, é aplicado os 6Ms (medida, máquina, método, material, mão de obra e meio ambiente).
- Formação de um Brainstorming (tempestade de ideias) sobre o problema levando em consideração a estrutura dos 6Ms.
- A análise das causas e os fatores que estão atrelados para a seguir planejar as ações solutivas.

Sendo possível observar na Figura 15 como ficaram as causas e subcausas mapeadas do diagrama.



Fonte: Grupo Voitto

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

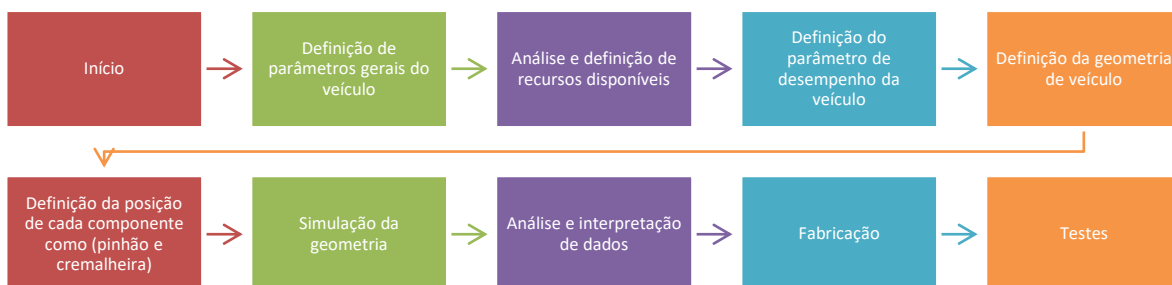
Nesta etapa do projeto será abordado todo o desenvolvimento de estudo e atividades realizadas para alcançar os objetivos traçados. A pesquisa envolveu, levantamento bibliográfico e entrevistas com membros da equipe. A elaboração do presente trabalho teve o intuito de analisar do sistema de direção do protótipo XSI da equipe Caraubaja SAE, pertencente a UFERSA, Campus Caraúbas.

3.1 Objeto de Estudo – SISTEMA DE DIREÇÃO

O modelo do protótipo de referência para o presente trabalho é o veículo *off-road* (fora de estrada) XSI de competição BAJA, equipado com uma suspensão do tipo duplo A na dianteira e sistema de direção mecânica do tipo pinhão cremalheira.

O projeto do Caraubaja segue conforme o procedimento visto no fluxograma na Figura 16, onde pretende-se analisar o regulamento da competição e definir parâmetros iniciais do projeto concordantes com o que o carro será submetido.

Figura 16 – Fluxograma de atividades desenvolvidas no projeto



Fonte: Autoria Própria

Nesse trabalho será usado o Autodesk Inventor 2023 versão estudante, que permite também avaliar o comportamento mecânico dos sistemas desenhados, através de simulações de tensão, mostrando as deformações causadas pelos esforços de entrada assim como gravidade e outros fatores externos.

O sistema de direção do protótipo XSI tem como principais objetivos, a facilidade e agilidade em manobrar o carro nos mais variados tipos de terrenos, além de sempre que possível oferecer ao piloto conforto, boa manobrabilidade e segurança. Esse sistema é um dos responsáveis pela estabilidade dinâmica do veículo. O sistema de direção, utiliza o mecanismo pinhão-cremalheira devido ser um elemento conversor de

movimento que mais se adequa aos parâmetros de projeto, devido à sua facilidade de fabricação, manutenção e ajuste dos parâmetros cinemáticos, quando comparado aos outros modelos.

Os principais parâmetros do sistema de direção a ser estudado são apresentados na Tabela 1, onde serão utilizados como dados de entradas nas simulações computacionais realizadas.

Tabela 1 – Parâmetros de dados do Sistema de Direção

Parâmetros do veículo	Dimensões
Entre eixos	1450 mm
Bitola dianteira	1330 mm
Bitola traseira	1430 mm
Raio de pneu	292,1 mm
Peso do veículo total	183 kg
Inclinação do pino mestre	11,5°
Ângulo de Caster	20°
Distância do pino mestre até o ponto de fixação do braço de direção	68,3 mm
Distância do CG (centro de gravidade) ao eixo traseiro no sentido longitudinal	586,9 mm
Espaço disponível no chassi para fixação da caixa de direção	361,54 x 442,519 mm ²
Diâmetro do volante	310 mm
Relação de transmissibilidade do conjunto de direção	3,22:1

Fonte: Autoria Própria

3.2 Caracterização dos Pontos a Serem Analisados

Para identificar as possíveis pontos de melhorias e detecção de falhas do sistema de direção, foi utilizado ferramentas da qualidade que permite buscar aumentar a confiabilidade. As ferramentas escolhidas foram: FMEA e o Diagrama de Ishikawa, já que são métodos bastantes aplicados nas grandes empresas, nos quais são respeitados os critérios de ordem de avaliação das causas, como também apresentam resultados satisfatórios.

O FMEA é uma metodologia usada para prever uma possível ocorrência de falha que permite buscar aumentar a confiabilidade dos produtos ou dos processos envolvidos dentro de um ambiente. Os seus resultados são baseados na análise de dados, realizando a quantificação da severidade, ocorrência e detecção. Já o diagrama de Ishikawa é uma ferramenta que ajuda a identificar os possíveis efeitos e causas para que

problemas ocorram. Para utilização desta técnica é preciso conhecer o processo e o problema bem definido.

Para a aplicação dessas ferramentas, foram necessárias captar as informações relacionadas aos protótipos anteriores, assim como conversas com os membros antigos para que fosse possível montar os dados necessários. Após a obtenção destes dados, foram realizadas uma filtragem e uma organização das informações, como por exemplo um *checklist* adotado antes e após uso do carro nas competições de modo que assim facilitasse a aplicação dessas ferramentas.

3.3 Metodologia Adotada para Elaboração dos Planos de Ações

O estudo foi desenvolvido com base nos dados da geometria de direção do protótipo XSI. No entanto, é importante ressaltar que esse modelo deve ser aplicado apenas em condições onde não há forças laterais ou de tração, as quais são consideradas irrelevantes.

Durante os testes do protótipo, observou-se que o desempenho não estava satisfatório. Por esse motivo, surgiu a necessidade de investigar as possíveis causas do problema. Como resultado desse processo, foram identificados alguns problemas, tais como a força exercida no volante do carro, cremalheira empenada e também um salto na engrenagem (pinhão + cremalheira) da caixa de direção.

Com o intuito de garantir o funcionamento eficiente do sistema de direção, foram propostos alguns planos de ações para abordar esses problemas, buscando reduzi-los ou resolvê-los completamente.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Detecção dos Problemas a Serem Analisados no Sistema de Direção

Durante o trabalho foram feitas análises do veículo antes e depois da competição, através do *checklist* (Anexo A) e brainstorming com os envolvidos no projeto Caraubaja SAE, assim foram identificados os potenciais problemas relacionados ao sistema de direção.

4.1.1 Aplicação do FMEA

Para o desenvolvimento da FMEA foi necessário identificar como era realizado a detecção dos modos de falha. A parte da FMEA permite a análise concreta do processo que é o cálculo do NPR onde é feita a multiplicação dos valores de severidade, ocorrência e detecção, sendo necessário dar pontuações a cada item. Com o exemplo usado no referencial teórico na seção 2.7.3, foi possível montar um diagrama que tendesse ao mesmo raciocínio proposto. Realizando a pontuação com auxílio das tabelas descrita Na seção 2.7.3 deste trabalho, pode-se montar o diagrama do FMEA, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultado do diagrama de FMEA

Nome do Componente	Função	Modo de falha	Efeito potencial da Falha	O	S	D	NPR (OxSxD)
Sistema de direção	Transmitir o movimento do volante para as rodas através de um conjunto de peças articuladas	Direção pesada	Defeito no sistema de direção	6	8	2	96
		Salto da engrenagem (cremalheira e pínhão)		9	7	4	252
		Folga na flange do volante		4	3	5	60
		Travamento do rolamento linear		2	7	2	28
		Porca do Olhal em U solta		4	10	1	40
		Fita do volante sem cola		5	2	1	10
		Cremalheira empenada		4	7	3	84
		Fissuras na coifa da caixa		5	2	3	30
		Trinca na coluna de direção		1	7	2	14
		Travamento do rolamento da caixa de direção		3	4	4	48

Fonte: Autoria Própria

Após calculado o valor do NPR, foi possível identificar quais atividades necessitavam de maior atenção. No caso estudado, os modos de falhas que receberam maior risco estão identificados pela cor vermelho, logo foram direção pesada, salto da engrenagem e cremalheira empenada. Isto quer dizer que estas falhas merecem atenção especial e, portanto, necessitam de ações mais eficazes. Além disso, os outros maiores riscos calculados estão identificados na cor amarelo, do qual é caracterizado pelo modo de falha devido travas e folgas. É possível que, após a realização das ações recomendadas, resulte numa diminuição da ocorrência das causas. Essa metodologia aplicada pode melhorar a detecção do problema ou amenizar a severidade dos efeitos nos subsistemas do protótipo, consequentemente diminui-se um ou mais desses índices e chega-se então, a um valor NPR mais baixo.

A legenda de cores utilizada na planilha da FMEA para diferenciar as atividades de maiores riscos das demais são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Legenda do NPR

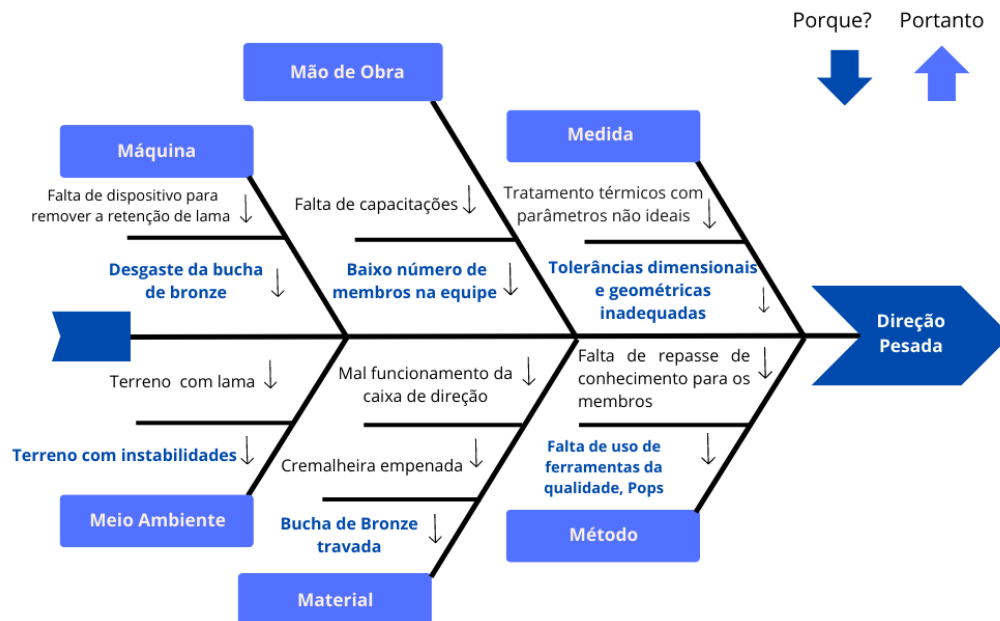
Legenda de NPR	Valor
Branco	Menor que 48
Amarelo	Entre 48 e 60
Vermelho	Maior ou igual 84

Fonte: Autoria Própria

4.1.2 Diagrama de Ishikawa

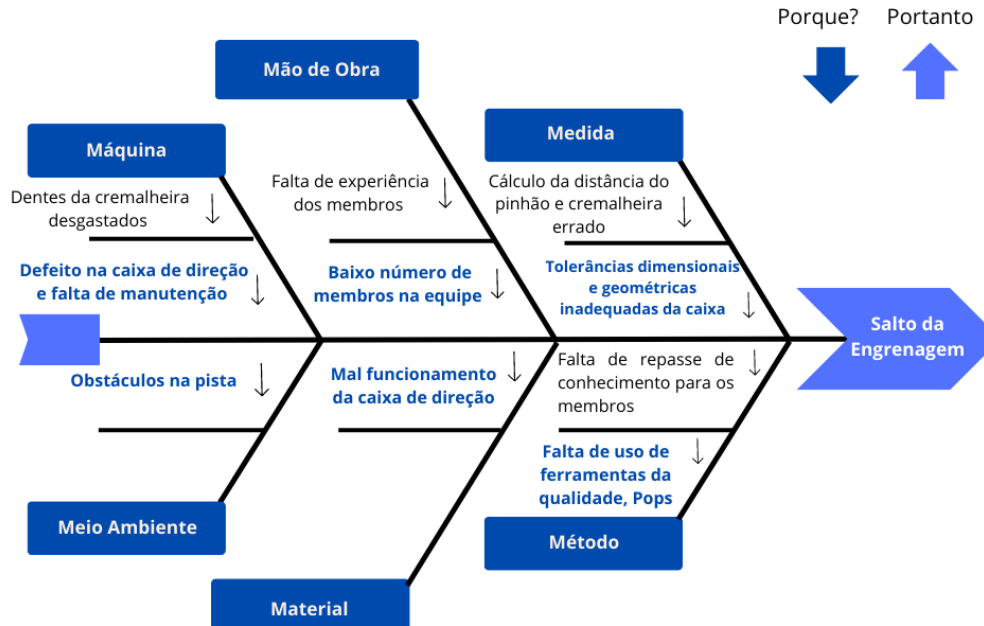
Através do procedimento mencionado no referencial teórico relativo a Diagrama de Ishikawa, foi possível utilizar esta ferramenta de análise para a otimização estudada, no qual permitiu-se expor nas Figuras 20 e 21, o resultado do diagrama de *Ishikawa* deste trabalho, produzido a partir da ocorrência do salto da engrenagem (cremalheira + pinhão) e o sistema de direção pesada do BAJA. Já a causa raiz da cremalheira empenada pode ser resolvida com as outras duas causas abordadas, visto que há causas raízes semelhantes entre elas. A obtenção dos resultados teve por base as entrevistas com os membros e em testes realizados. A análise das variáveis obtidas neste diagrama, permite uma melhor análise para o diagrama do FMEA. As Figuras 17 e 18 detalha as estruturas dos diagramas.

Figura 17 – Resultado do diagrama de Ishikawa (Direção Pesada)



Fonte: Autoria Própria

Figura 18 – Resultado do diagrama de Ishikawa (Salto da Engrenagem)



Fonte: Autoria Própria

Com a aplicação do Diagrama *Ishikawa*, são obtidos os principais fatores que possam ser causadores-raízes de um determinado problema. Com um estudo mais detalhado, conseguiu-se identificar os principais problemas que neste caso para a direção pesada são as tolerâncias dimensionais e geométricas inadequadas, baixo

número de membros na equipe, desgaste da bucha de bronze, terreno com instabilidades, bucha de bronze travada e falta de uso de ferramentas da qualidade.

Já salto da engrenagem requer tolerâncias dimensionais e geométricas inadequadas da caixa, baixo número de membros na equipe, defeito na caixa de direção e falta de manutenção, obstáculos na pista, mal funcionamento da caixa de direção e falta de uso de ferramentas da qualidade, dessa forma, ao identificar essas causas fundamentais foram desenvolvidos planos de ação em função deles para que possam amenizá-los ou anula-los durante os testes do protótipo.

4.2 Planos de Ações

Após identificar as principais causas raízes, foram analisadas as que teriam maior impacto negativo para o projeto e assim foi realizado um plano de ação para cada problema que conseguisse demonstrar as medidas que resolveriam ou até mesmo eliminariam as causas.

4.2.1 Plano de Ações para Direção Pesada

Com as informações apresentadas nos Diagramas de Ishikawa, foi possível observar e sugerir planos de ações que podem ser tomadas. Com base nessas ações foram selecionadas as que seriam implementadas no sistema de direção, como mostra o Quadro 6 com o plano da ação.

Quadro 6 – Plano de Ação (Direção Pesada)

Plano de Ação - Direção Pesada	
Causa Raiz	Plano de Ação
Tolerâncias dimensionais e geométricas inadequada	Nova caixa de direção com gabarito
Baixo número de membros na equipe	Aumentar a divulgação do processo seletivo
Desgaste da bucha de bronze	Uso de coifas para a caixa e retentores
Terreno com instabilidades	Piloto experiente e pneus adequados
Bucha de Bronze travada	Utilização de rolamentos lineares
Falta de uso de ferramentas da qualidade, Pops	Implementação de ferramentas para auxiliar membros futuros e o projeto

Fonte: Autoria Própria

4.2.1.1 Nova Caixa de Direção com Gabarito

A caixa de direção é responsável pela articulação entre a coluna de direção e os braços de direção, que são conectados as rodas. A caixa é composta por diversas peças,

como já citado na seção 2.3, à usada nesse trabalho é a direção mecânica do tipo pinhão e cremalheira, no qual o movimento do volante é transmitido diretamente para as rodas, através de engrenagens e mecanismos. Consequentemente, se fez necessário fazer um novo gabarito da caixa de direção, com novas tolerâncias dimensionais, para comparar com as já usadas anteriormente e testá-las, sendo importante calcular a distância entre o pinhão e a cremalheira, evitando que o gabarito tenha os mesmos problemas da caixa de direção anterior. As Figuras 19 e 20 apresentam o gabarito usado para executar a nova caixa e a caixa pronta.

Figura 19 – Gabarito da Nova Caixa de Direção



Fonte: Autoria Própria

Figura 20 – Nova Caixa de Direção



Fonte: Autoria Própria

4.2.1.2 Aumentar a Divulgação do Processo Seletivo

Para processos seletivos, algumas estratégias podem ser adotadas como: Utilizar as redes sociais de maneira mais recorrentes na divulgação, divulgar o processo nas salas de aulas (explicando o que é o projeto e como funciona cada subsistema, além de tirar dúvidas dos possíveis participantes), mandar e-mails para os coordenadores dos cursos informando sobre as vagas e sobre o processo. Durante as etapas realizar palestras de aberturas para os candidatos terem uma melhor percepção do que é o Caraubaja SAE, o BAJA SAE e as competições, assim como uma roda de conversas com todos os envolvidos, o que ajudaria a quebrar a barreira do primeiro contato. A Figura 21 mostra a entrevista do Processo Seletivo 2022.2.

Figura 21 – Processo Seletivo 2022.2



Fonte: Autoria Própria

4.2.1.3 Uso de Coifas para Caixa e Retentores

As coifas e os retentores são importantes por terem a função de proteger o sistema de direção contra a entrada de sujeiras, poeiras ou outros detritos que possam causar danos e desgaste das peças como citado as buchas de bronze, pinhão e cremalheira, para prolongar, assim, a vida útil das peças e garantir um funcionamento eficiente do protótipo. A coifa por ser uma capa protetora de borracha envolve o mancal, junto com a caixa para evitar essa degradação, além de ajudar a reter a lubrificação das peças internas, como a cremalheira e o pinhão. Após pesquisas de mercado foi observado que a coifa que mais se adequa ao sistema é a do modelo usado no carro

Gol 1996. Já os retentores retêm a graxa lubrificante usada no interior da caixa, impedindo que vaze para fora e contamine o sistema com impurezas. O retentor escolhido foi o tipo: Retentor pinhão (Borr), modelo: *Today/Titan* 20mmx34mmx7mm para uso de acordo com o diâmetro da cremalheira, já que é o único que consegue oferecer melhores resultados. As Figuras 22 e 23 mostram quais os materiais que são usados.

Figura 22 – Coifa de Direção



Fonte: Autoria Própria

Figura 23 – Retentor



Fonte: Autoria Própria

4.2.1.4 Piloto Experiente e Pneus Adequados

Outro Plano de Ação seria um piloto experiente que conheça as pistas e consiga passar nos obstáculos com o mínimo possível de desgaste do veículo. Uma forma disso ocorrer é implementar uma cultura com vídeos e bate papos entre os pilotos antigos e atuais, sobre como se obteve êxito nos obstáculos e nas dificuldades enfrentadas durante as competições e testes.

Os pneus *carlisle at 489 23x7-10*, são usados no protótipo já que foi realizado um estudo para as competições a partir da caracterização dinâmica e da rigidez do pneu, como também testes de carregamento versus deflexão (*load-deflection(ld)*) e de amortecimento, por meio da metodologia experimental de Mosquem (2012). Outra opção para uso são os pneus do tipo Mud, visto que são bastante usados na lama e possuem uma boa aderência, essencial para ser usado nas competições nos períodos das chuvas. Além disso foi gerado um *checklist* para analisar a escolha da pressão dos pneus, de acordo com cada tipo de pista e obstáculos, já que uma pressão baixa é boa para absorver melhor os impactos e melhorar a tração, devido o pneu ter uma área maior de contato, no entanto, uma pressão alta pode obter mais velocidade, porém diminui a capacidade da tracionar. A Figura 24 mostra os testes realizados para a etapa nacional 2023 da competição BAJA SAE, e o Quadro 7 o *checklist* usado.

Quadro 7 – Checklist Pneus

Checklist - Pressão para Pneus		
	Pressão Baixa	Pressão Alta
Pista com lama	x	
Obstáculos profundos	x	
Areia frouxa	x	
Terrenos inclinados	x	
Asfalto		x
Terrenos com pedras		x

Fonte: Autoria Própria

Figura 24 – Teste Nacional 2023



Fonte: Equipe Caraubaja SAE (2023)

4.2.1.5 Utilização de Rolamentos Lineares

Os Rolamentos Lineares são usados para permitir movimentos suaves e lineares das cargas aplicadas. Eles são projetados para ter menos atrito e desgastes nas peças. São comumente usados nos sistemas de transportes e sistemas de movimentação de materiais. Sendo assim, foi escolhido o rolamento do tipo Modelo: Kh-2030 / Medida: 20x28x30, conforme a Figura 25, para usar no sistema de direção, visto que se adaptaria melhor as mudanças impostas, como por exemplo a troca das buchas por eles, já que possui movimentos suaves, precisos e mais eficientes.

Figura 25 – Rolamento Linear

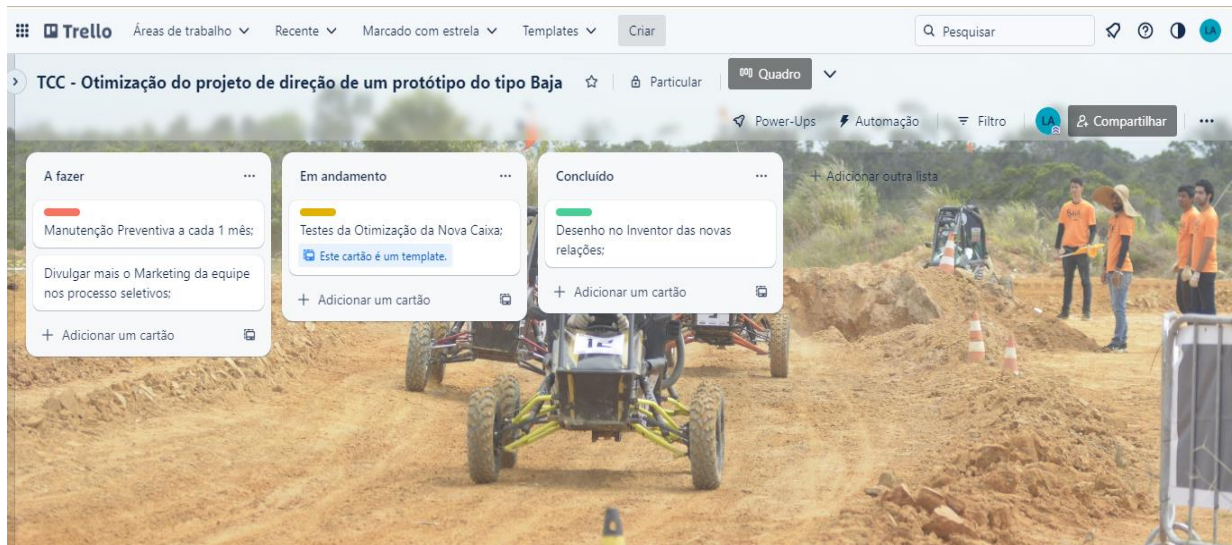


Fonte: Autoria Própria

4.2.1.6 Implementação de Ferramentas para Auxiliar Membros Futuros e o Projeto

As ferramentas da qualidade são métodos aplicados para melhorar a qualidade de um produto/serviço, e o POP (Procedimento Operacional Padrão) é um documento que estabelece instruções detalhadas sobre como realizar uma tarefa ou atividade com todos os padrões de qualidade exigidos. Os dois podem ser usados para melhoria dos processos, analisando e identificando os problemas para desenvolver soluções que os eliminem ou minimizem. Algumas dessas ferramentas foram usadas no trabalho como Fluxograma das atividades desenvolvidas, Diagrama de Ishikawa, FMEA e o Trello, para garantir que os dados sejam coletados corretamente e organizados, de maneira que seja possível auxiliar os participantes tanto nesse trabalho como em futuros no projeto. A Figura 26 demonstra a interface usada no Trello para o trabalho.

Figura 26 – Demonstração da Interface do Trello



Fonte: Autoria Própria

4.2.2 Planos de Ações para Salto da Engrenagem

Outra solução após os estudos e diagramas realizados, são os planos de ação para o salto da engrenagem, algumas das ações foram usadas para os dois planos, como as apresentadas no Quadro 8, nova caixa de direção com gabarito, aumentar a divulgação do processo seletivo, piloto experiente, gabaritos melhores da caixa e a implementação de ferramentas da qualidade no projeto.

Quadro 8 – Plano de Ação (Salto da Engrenagem)

Plano de Ação - Salto da Engrenagem	
Causa Raiz	Plano de Ação
Tolerâncias dimensionais e geométricas inadequadas da caixa	Nova caixa de direção com gabarito
Baixo número de membros na equipe	Aumentar a divulgação do Processo Seletivo
Defeito na caixa de direção e falta de manutenção	Planejar as manutenções preventivas e Alterar no Projeto da Caixa de Direção
Obstáculos na pista	Piloto experiente
Mal funcionamento da caixa de direção	Fazer gabaritos melhores
Falta de uso de ferramentas da qualidade, Pops	Implementação de ferramentas para auxiliar membros futuros e o projeto

Fonte: Autoria Própria

4.2.2.1 Planejar Planos de Manutenção Preventivas e Alteração no Projeto da Caixa de Direção

4.2.2.1.1 Planejar Planos de Manutenção Preventivas

Para planejar os planos de manutenção é necessário envolver várias etapas para garantir que os equipamentos funcionem de maneira eficiente e confiável, como também aumentar a vida útil dos materiais, que é essencial tanto para o funcionamento como para a economia. Para isso é preciso criar um cronograma de manutenções, as horas trabalhadas e a frequência de troca das peças. O Quadro 9 exemplifica uma das propostas de planos de manutenção.

Quadro 9 – Exemplo de Plano de Manutenção Preventiva

PLANO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA - SISTEMA DE DIREÇÃO			
N °	Operações/Ações	Medidas a tomar	Periodicidade de tempo
1	Troca de rolamentos do eixo do volante	Trocar	A cada competição (Início e final do ano)
2	Verificação de impurezas dentro da caixa de direção	Limpar sempre que necessário	1 vez por mês (a depender do fluxo de uso do veículo)
3	Troca de retentor e rolamentos lineares	Verificar e se necessário trocar	A cada 6 meses
4	Troca de parafusos e porcas	Trocar	Sempre que a rosca estiver remuída (verificar a cada 2 meses)
5	Verificação do desgaste do dentes da cremalheira e pinhão	Verificar e se necessário trocar	A cada competição (Início e final do ano)
6	Deformação plástica do sistema de direção	Trocar a peça	A cada competição (Início e final do ano)
7	Verificar a coifa do sistema	Trocar	A cada competição (Início e final do ano)
8	Verificar o funcionamento dos terminais	Verificar e se necessário trocar	A cada competição (Início e final do ano)

Fonte: Autoria Própria

4.2.2.1.2 – Alteração no Projeto da Caixa de Direção

Nessa etapa, reunindo os planos de ações e as informações com os membros da equipe, foi projetado um novo sistema de direção, agora usando um esbarro de latão dentro da caixa.

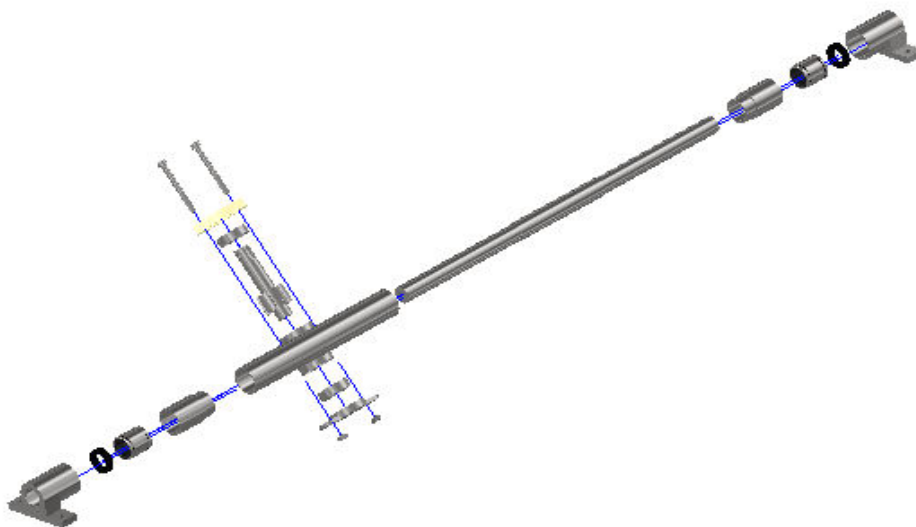
Para obter uma compreensão mais aprofundada do projeto, foi realizado um esboço 3D de um esbarro de latão dentro da caixa de direção nova, com a finalidade de pressionar a cremalheira quando ela fosse fletir dentro da caixa. Para garantir que o piloto não tenha problemas com salto da engrenagem do pinhão e cremalheira ao passar em obstáculos. As Figuras 27, 28 e 29 ilustram a vista explodida da caixa de direção antes e após o esbarro.

Figura 27 – Vista explodida da antiga caixa de direção



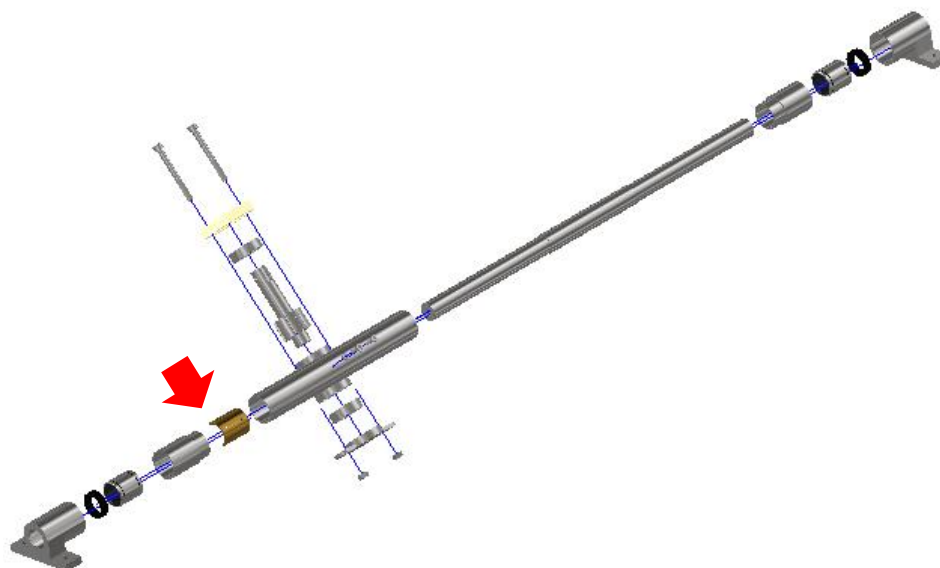
Fonte: Equipe Caraubaja SAE (2023)

Figura 28 – Vista Explodida da nova caixa de direção sem esbarro



Fonte: Autoria Própria

Figura 29 – Vista explodida da nova caixa de direção com esbarro



Fonte: Autoria Própria

Durante os estudos com uma matriz de escolha foi analisado qual a melhor abordagem possível de fixação do esbarro na caixa e a melhor decisão foi usar parafusos já que é possível ter uma melhor manutenção tanto da caixa, dos parafusos quando precisar trocar e do próprio esbarro, conforme mostram as Figuras 30 e 31.

Figura 30 – Esbarro de Latão e Parafusos



Fonte: Autoria Própria

Figura 31 – Nova Caixa com esbarro



Fonte: Autoria Própria

Logo, por fim a Figura 32 demonstra o sistema de direção completo após todas as modificações realizadas para a sua melhoria.

Figura 32 – Sistema de Direção Protótipo XSI



Fonte: Equipe Caraubaja SAE (2023)

5 CONCLUSÃO

Através das informações coletadas com os membros, o trabalho apresentou resultados satisfatórios através do uso das ferramentas da qualidade FMEA e Diagrama de Ishikawa. Foram proposto melhorias para aprimorar a detecção das falhas encontradas, como Direção pesada e Salto da engrenagem (pinhão + cremalheira). Cada etapa da análise desses processos foi evidenciada através de passos descritos no presente trabalho.

As soluções propostas requerem o uso de um Brainstorming (tempestade de ideias) e Checklist repassada para o subsistema de direção, já que houve um melhor entendimento dos problemas dessa maneira. Outra solução proposta é usar a metodologia das ferramentas de qualidade, para analisar todos os problemas e causas raízes, e em seguida propor planos de ações e manutenção para garantir que os equipamentos funcionem de maneira mais eficiente e confiável.

Por fim, conclui-se que a metodologia definida para esta monografia detecta e faz melhorias para o projeto do sistema de direção, assim como cria oportunidades para a definição de novos conceitos deste tipo de sistema dentro do mundo da competição BAJA SAE Brasil.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Bruno Cristian. **Desenvolvimento de um sistema de direção para um veículo off-road do tipo baja sae**. 2016. 64 p. Monografia (Bacharel em Ciência e Tecnologia)- Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2016. 1.

CARLSON, C. S. **Effective FMEAs: achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis**. Danvers, United States of America: Wiley e Sons, Inc, 2012.

CERVO, Matheus Ribeiro. **Projeto de Geometria de direção para veículo off-road do tipo Baja SAE**. 2017. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2017.

DINIZ, Diego David Silva. **Estudo Da Dinâmica Vertical Em Suspensão Duplo A De Um Veículo Off-Road Tipo Baja**. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - Pb, 2014.

FERNANDES, Marcelo Arronilas. **Estudos em um sistema de direção veicular**. 2005. 99 p. Dissertação (Título de Mestre Profissional em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

FOGLIATTO, F. S.; DUARTE, J. L. R. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

GILLESPIE, THOMAS D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. 1992. Society of Automotive Engineers, Inc.

HECKERT, C. R.; FRANCISCHINI, P. G.; ROTONDARO, R. G. **Qs-9000: a iso já não é o bastante**. Production, SciELO Brasil, v. 8, n. 1, p. 5–16, 1998.

IQA, I. **Manual de referência-análise do modo de falha e efeitos de falha potencial (FMEA)**. São Paulo, Brasil, 75 p., 2008.

LIMA, P. F. A.; FRANZ, L. A. S.; AMARAL, F. G. **Proposta de utilização do FTA como ferramenta de apoio ao FMEA em uma empresa do ramo automotivo**. SIMPEP – XIII Simpósio de Engenharia de Produção, 2006.

MEDEIROS, Ruthenio Severo de. **Análise e estudo de solução para falha no sistema de transmissão do troller**. 2016. 66 p. Monografia - Curso de Bacharel em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2016.

OLIVEIRA, Rodrigo Luiz Pinheiro de. **Impactos da qualidade percebida sobre as atitudes e intenções comportamentais de proprietários de automóveis**. 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Mestrado da Faculdade de Ciências Empresariais da Universidade Fumec, Universidade Fumec, Belo Horizonte, 2012.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos: Uma referência para melhoria de processos**. São Paulo: Saraiva, 2006.

SAE Brasil, (org.). **Programas Estudantis: O que é o Baja**. 2023. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil/>. Acesso em: 01 fev. 2023a.

WERKEMA, M.C.C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**.

APÊNDICE A – CHECKLIST DE PERGUNTAS ANTES E APÓS AS COMPETIÇÕES



CARAUBAJA SAE

CHECKLIST	SIM	NÃO
1. Foi encontrado impurezas na caixa de direção?		
2. Ocorreu salto de engrenagem (cremalheira + pinhão)?		
3. O olhal em U sofreu desgaste?		
4. Qual a melhor relação dos batedores da direção?		
5. A fita usada no volante de direção, está satisfeita ao piloto?		
6. O volante apresentou folgas na flange e nos parafusos do sistema de direção?		
7. Houve folga dos arames de freio usado no olhal em U?		
8. O alinhamento usado nos braços de direção está apresentando resultados satisfatório ao esterçamento das rodas?		
9. O rolamento linear usado na caixa está apresentando travas?		
10. A cremalheira mostrou algum sinal de deformação?		
11. Os rolamentos do volante e da caixa apresentaram algum defeito?		