



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CAMPUS CARAÚBAS
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

GABRIEL DA SILVEIRA WANDERLEY

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE ACOPLAMENTO PARA UM
VEÍCULO DO TIPO BAJA SAE**

CARAÚBAS

2025

GABRIEL DA SILVEIRA WANDERLEY

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE ACOPLAMENTO PARA UM
VEÍCULO DO TIPO BAJA SAE**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido UFERSA, Campus Caraúbas como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Diego David Silva Diniz

CARAÚBAS

2025

© 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 tomar-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.

SW245 Wanderley, Gabriel da Silveira.
pd Desenvolvimento de um módulo de acoplamento
para um veículo do tipo BAJA SAE / Gabriel da
Silveira Wanderley. - 2025.
56 f. : il.

Orientador: Diego David Silva Diniz.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. BAJA SAE. 2. 4x4. 3. Acoplamento. 4. Eixo.
5. Dog clutch. I. Diniz, Diego David Silva ,
orient. II. Título.

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

Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra
CRB: 15/1052

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.

GABRIEL DA SILVEIRA WANDERLEY

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE ACOPLAMENTO PARA UM
VEÍCULO DO TIPO BAJA SAE**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido UFERSA, Campus Caraúbas como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 11 / 03 / 2025

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. Wendell Albano (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder coragem, força e determinação para seguir nesta caminhada, enfrentando desafios e superando obstáculos. Sem sua luz essa conquista não seria possível.

Dedico este trabalho, com imensa honra, aos meus avós Francisco das Chagas e Maria José, e ao meu tio Francisco Felipe, pela paciência, esforço e dedicação em me proporcionar a oportunidade de cursar uma universidade longe de minha cidade natal. Foram vocês que sempre me incentivaram e incentivam a buscar um futuro melhor, acreditando no meu potencial e me apoiando, este trabalho e diploma não é meu e, sim de vocês, muito obrigado por tudo.

À minha namorada, Ildênia Leiany, minha parceira incansável nesta trajetória, sou imensamente grato. Suas crenças em mim e seu apoio diário foram fundamentais para que eu jamais desistisse dos meus sonhos. Você esteve ao meu lado em momentos de incerteza, ouvindo meus desabafos e me encorajando a seguir em frente.

Ao meu orientador, Diego David, expresso minha gratidão não apenas pela orientação acadêmica e profissional, mas também pelos conselhos valiosos que transcenderam os muros da universidade. Seus ensinamentos foram fundamentais para minha formação acadêmica, bem como indivíduo.

Aos amigos Andrei Mendes, Moisés Costa e toda equipe do Caraubaja SAE que sempre acreditaram em minha trajetória profissional e me incentivaram a buscar excelência nos meus projetos, sou profundamente grato. O apoio e a confiança de vocês foram essenciais para que eu mantivesse minha determinação e persistência.

Ao amigo e técnico do laboratório Samir Sena, meus sinceros agradecimentos pela paciência e colaboração sempre que precisava utilizar o laboratório você estava sempre disponível. Sua disponibilidade foi crucial para a realização deste trabalho.

À banca examinadora, expresso minha gratidão pela dedicação e disponibilidade em avaliar este trabalho. O olhar criterioso e as considerações feitas não apenas foram desenvolvidas para o aprimoramento deste estudo, mas também agregaram valor ao meu crescimento acadêmico e profissional.

Por fim, com o coração repleto de saudades e gratidão, dedicado este trabalho à mulher de alma mais pura que tive o privilégio de conhecer e amar, minha querida tia Fernanda Araújo (*In Memoriam*). Desde os meus primeiros passos na vida estudantil, você esteve ao meu lado, me ajudando nos deveres escolares e cuidando de mim com todo amor e dedicação. Seu amor incondicional moldou quem sou hoje, e lamento profundamente que não esteja aqui para compartilhar essa conquista comigo. Sua presença será eternamente sentida em meu coração.

Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.

Josué 1:9

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto e a fabricação de um módulo de engate e desengate de eixos para um veículo do tipo Baja SAE. A necessidade de implementar um sistema de tração 4x4 nos protótipos baja surgiu devido às novas regulamentações da SAE, exigindo maior desempenho em terrenos acidentados. O estudo propõe o desenvolvimento de um sistema de acoplamento que permita a alternância entre os modos 4WD e 2WD de maneira prática e eficiente. A metodologia envolveu uma pesquisa de mercado sobre sistemas de acoplamento das engrenagens de caixa de marcha de motos e, transmissão 4x4, as análises das soluções viáveis foram feitas por meio de matrizes de decisão e modelagem tridimensional dos componentes utilizando CAD. O dimensionamento dos eixos e engrenagens foi realizado com base em cálculos de resistência mecânica e normas de engenharia. Além disso, foi analisada a compatibilidade do sistema com os demais componentes da transmissão do veículo, garantindo uma integração eficiente. A fabricação do sistema incluiu processos de usinagem em CNC, torno mecânico, fresadora e soldagem, além da aplicação de tratamentos térmicos para aumentar a resistência ao desgaste e à fadiga. Durante essa etapa, ajustes foram necessários para otimizar o funcionamento do módulo de engate e desengate, garantindo um acionamento preciso e sem folgas excessivas. Para garantir a confiabilidade do sistema, foi realizada uma análise de modos de falha e efeitos (FMEA), identificando possíveis problemas e implementando medidas preventivas. Além disso, testes iniciais foram conduzidos para verificar o funcionamento do acoplamento em diferentes condições de operação, possibilitando ajustes no projeto antes da competição. Os testes do protótipo foram conduzidos em diferentes tipos de terreno, e sua validação ocorreu durante as competições Baja SAE Nacional e Nordeste, onde o sistema demonstrou alto desempenho e confiabilidade, contribuindo para a conquista do primeiro lugar no pódio. A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar oportunidades de melhoria para futuras versões do sistema, visando aprimorar ainda mais sua eficiência e durabilidade. O estudo concluiu que o acoplamento do tipo dog clutch apresentou excelente desempenho para aplicações off-road, garantindo engate e desengate rápidos com eficiência.

Palavras-chave: baja SAE; 4x4; acoplamento; eixo; *dog clutch*.

ABSTRACT

This paper presents the design and manufacture of a coupling module and axle development for a Baja SAE type vehicle. The need to implement a 4x4 traction system in low-profile prototypes arose due to new SAE regulations requiring greater performance on rough terrain. The study proposes the development of a safety system that allows switching between 4WD and 2WD modes in a practical and efficient manner. The methodology involves a market research on gear stiffness systems for motorcycle gearboxes and 4x4 transmissions, as well as analyses of viable solutions were made through decision matrices and three-dimensional modeling of the components using CAD. The dimensioning of the axles and gears was carried out based on mechanical strength calculations and engineering standards. In addition, the compatibility of the system with the other components of the vehicle's transmission was verified, ensuring efficient integration. The manufacturing of the system included CNC machining, lathe, milling and welding processes, in addition to the application of heat treatments to increase resistance to wear and fatigue. During this stage, adjustments were necessary to optimize the operation of the coupling and release module, ensuring precise operation without excessive clearances. To ensure the reliability of the system, a failure mode and effects analysis (FMEA) was performed, identifying potential problems and implementing preventive measures. In addition, initial tests were planned to verify the functioning of the solid under different operating conditions, enabling adjustments to the design before the competition. The prototype tests were conducted on different types of terrain, and its validation took place during the Baja SAE Nacional and North East competitions, where the system demonstrated high performance and reliability, contributing to the achievement of first place on the podium. Based on the results obtained, it was possible to identify opportunities for improvement for future versions of the system, further advancing its efficiency and durability. The study concluded that the dog clutch shield presented excellent performance for off-road applications, ensuring fast coupling and release with efficiency.

Keywords: baja SAE; 4x4; coupling; axle; dog clutch.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estruturas de transmissões AWD e 4WD.....	22
Figura 2- Ilustração de um sistema 2WD.	24
Figura 3- Ilustração do conceito de transmissão 4x4.	25
Figura 4- Demonstração de um acoplamento de motor elétrico.	27
Figura 5- Acoplamento por engrenagens.....	27
Figura 6- Acoplamento tipo mandíbulas.	28
Figura 7- Acoplamento de grade Falk.....	28
Figura 8- Acoplamento móvel.	29
Figura 9- Embreagem multidiscos.	29
Figura 10- Embreagem cachorro.....	30
Figura 11- Fluxograma do processo.....	32
Figura 12- Protótipo do Caraubaja (objeto de estudo).	33
Figura 13- Ciclo das práticas de modelagem do produto.	35
Figura 14- Ilustração do espaço disponível para a caixa de acoplamento.....	36
Figura 15- Sistema de transmissão 4x2 do Caraubaja SAE	38
Figura 16- Caixa de acoplamento	46
Figura 17- Vista explodida, da caixa de acoplagem e desacoplagem	47
Figura 18- Sistema de transmissão 4x4 do Caraubaja SAE	47
Figura 19- Caixa pronta para recebimento dos mancais	48
Figura 20- Usinagem dos mancais	49
Figura 21- Caixa com os mancais soldados.....	49
Figura 22- Caixa de acoplamento finalizada e montada	50
Figura 23- Frame do funcionamento do acoplamento.....	51
Figura 24- Caixa de acoplamento instalada no protótipo	52
Figura 25- Frame do teste de funcionalidade da transmissão 4x4, no Nacional 2024.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Matriz de decisão para o melhor tipo de acoplamento	44
Tabela 2- Dimensão da engrenagem	45
Tabela 3- Diâmetro dos eixos.	46
Tabela 4- FMEA da engrenagem deslizante.....	54
Tabela 5- FMEA do garfo de acionamento	54
Tabela 6- FMEA da engrenagem fixa	55
Tabela 7- FMEA da lubrificação.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos
Dr	Doutor
CAD	Design Assistido por Computado
CVT	Transmissão continuamente variável
AWD	Tração nas quatro rodas
4WD	Tração nas Quatro Rodas
2WD	ração nas duas rodas
CNC	Controle Numérico Computadorizado
FMEA	Análise de Modos de Falha e Efeitos
NPR	Número de Prioridade de Risco
T_{adm}	Tensão admissível
σ	Tensão máxima (ou tensão de ruptura)
F_s	Fator de segurança
M_t	Momento torçor
P	Potência
Pi	Constante matemática
ω	Velocidade angular
F_t	Força tangencial
r	Raio
M_f	Momento fletor
X	Distância do ponto de aplicação da força até o primeiro ponto de apoio do eixo
Y	Distância do ponto de aplicação da força até o segundo ponto de apoio do eixo
M_i	Momento ideal
α	Fator de Correção relacionado às dimensões da peça e às condições de carregamento
d	Diâmetro
$\sigma_{tração}$	Tensão de tração admissível
T	Torque
N_p	Velocidade angular da engrenagem

H	Horas
σ_y	Limite de escoamento
σ_c	Tensão de cisalhamento
A	Área de contato dos dentes
Z	Quantidade de dentes
B	Largura dos Dentes no sentido da circunferência
L_f	Largura da face do dente
h	Altura nova do dente
b_1	Largura da engrenagem

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 Definição de automóvel	20
2.2 Transmissão	20
2.2.1 Tipos de transmissão	22
2.2.2 Transmissões de veículos terrestres	23
2.2.3 Tração 2WD.....	23
2.2.3.1 Tração AWD.....	24
2.2.3.2 Tração Part Time 4WD	25
2.2.3.3 Transmissão de um protótipo tipo baja SAE	26
2.4 Tipos de sistemas de acoplamento.....	26
2.4.1 Acoplamento de engrenagens	27
2.4.2 Acoplamentos com insertos flexíveis, tipo mandíbulas	28
2.4.3 Acoplamento de grade Falk	28
2.4.4 Acoplamentos móveis	29
2.4.4.1 Acoplamento por embreagem de fricção.....	29
2.4.4.2 Embreagem (acoplamento) do tipo cachorro (dog clutch)	30
3. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	32
3.1 Objeto de estudo	33
3.2 Análise de mercado	34
3.3 Modelagem do protótipo	35
3.4 Dimensionamento dos componentes	36
3.5 Descrição da etapa de fabricação e montagem do sistema de acoplamento.	42
3.6 FMEA (Failure Modes and Effects Analysis).....	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44

4.1 Definição do tipo de acoplamento	44
4.2 Modelagem computacional	45
4.3 Fabricação e Montagem.....	48
4.4 Testes e validações	50
4.5 Elaboração do FMEA	53
5. CONCLUSÃO	56
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUÇÃO

A indústria automobilística tem investido continuamente no aprimoramento dos sistemas de tração 4x4, buscando maiores eficiências, desempenho e economia de combustível. Com o avanço da tecnologia, novas soluções foram desenvolvidas para reduzir perdas mecânicas, melhorar a distribuição de torque entre os eixos e melhorar a resposta dos veículos em diferentes tipos de terreno.

Além disso, a integração de eletrônicos e sensores permitiu a criação de sistemas inteligentes, que ajustam automaticamente a tração conforme as condições de rodagem. Paralelamente, muitos veículos oferecem ao motorista a possibilidade de selecionar manualmente o modo de tração, permitindo que ele ativar ou desativar o 4x4 conforme a necessidade, o que é especialmente útil em terrenos off-road ou situações que requerem maior controle e aderência, Gomes (2022).

Com isto durante a graduação em engenharia, alguns estudantes buscam constantemente aprimorar suas habilidades e colocar em prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula e nas teorias estudadas. Um dos meios mais comuns para isso é a participação em projetos acadêmicos, como o Baja SAE, que oferece uma excelente oportunidade de aplicação prática. O Baja é um projeto incentivado pela SAE (Sociedade de Engenheiros Automotivos) Internacional, uma organização globalmente reconhecida por estabelecer normas e padrões para os setores automotivo e aeroespacial.

Criado em 1976 na Universidade da Carolina do Sul pelo Dr. John F. Stevens, o Baja SAE desafia estudantes de engenharia a projetar, construir e testar protótipos off-road. No Brasil, o projeto foi lançado pela SAE BRASIL em 1994 e tornou-se uma referência no aprendizado prático, permitindo que equipes universitárias desenvolvessem veículos inovadores para terrenos acidentados, aplicando os conceitos teóricos treinados.

As competições da Baja SAE no Brasil ocorrem em quatro fases: três regionais (Nordeste, Sudeste e Sul) e uma nacional. A etapa nacional reúne mais de 80 instituições e cerca de 1.900 alunos, onde os protótipos são avaliados em critérios como desempenho, inovação e conformidade com normas, consolidando-se como uma importante plataforma de formação para futuros engenheiros.

A partir do ano de 2023, novas regulamentações implementadas nas competições Baja SAE, especialmente nos eventos realizados nos Estados Unidos, passaram a exigir que os protótipos estejam equipados com sistemas de tração nas quatro rodas (4x4) para garantir sua participação. A justificativa para essa mudança está relacionada à crescente necessidade de os

veículos enfrentarem terrenos acidentados com maior eficiência, garantindo melhor desempenho em condições adversas, como lama, pedras e inclinações.

O sistema 4x4 (4WD ou AWD), ou tração nas quatro rodas, proporciona maior capacidade de tração e estabilidade, permitindo que o protótipo distribua a força do motor entre todos os eixos, o que é crucial em competições off-road. No Brasil, embora essa exigência ainda não seja obrigatória, a SAE BRASIL incorporou, de maneira opcional, a inclusão de sistemas 4x4 nas competições a partir de 2023, incentivando as equipes a desenvolverem soluções tecnológicas mais avançadas para enfrentar os desafios dos percursos e também terem a possibilidade de participar das competições mundiais nos Estados Unidos.

Com base nessa necessidade, o desenvolvimento de um veículo off-road 4x4 é de grande importância para superar os desafios impostos pelos terrenos das competições Baja. O projeto também propõe a implementação de um sistema de acoplamento e desacoplamento dos eixos, permitindo que o veículo alterne entre os modos 4WD e 2WD (tração em duas rodas), conforme as exigências do terreno.

Em específico, o sistema de tração 4WD trata-se de um sistema, onde o piloto pode selecionar manualmente quando deseja utilizar a tração nas quatro rodas, geralmente através de uma alavanca ou botão no interior do veículo. Em condições normais, o protótipo opera em tração apenas nas rodas traseiras (2WD), mas o motorista pode engatar a tração nas quatro rodas quando necessário.

Assim tornou-se necessário projetar um protótipo 4WD *Part-Time*, que oferece ao piloto a possibilidade de escolher entre tração nas quatro rodas ou apenas em duas a depender das condições do terreno, otimizando o desempenho em terrenos acidentados e melhorando a eficiência em terrenos mais suaves. Assim, neste trabalho foi desenvolvido um sistema de acoplamento semiautomático, controlado pelo piloto, que alia versatilidade, praticidade e rapidez de uso, proporcionando uma solução eficiente para os desafios encontrados nas competições baja SAE.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo o projeto e a confecção de uma caixa de acoplamento de eixos. Para isso, foi necessário abordar o objeto de estudo em profundidade, além de uma pesquisa realizada em oficinas mecânicas do setor automotivo, a fim de compreender o funcionamento do acoplamento das engrenagens na caixa de marchas de motocicletas, bem como o sistema de engates em veículos 4x4.

Com isto, tornou-se essencial a elaboração de um fluxograma da metodologia do projeto, permitindo que as etapas e fases do desenvolvimento fossem estruturadas de forma mais detalhada e objetiva, garantindo um fluxo lógico e bem definido.

Para a implementação do sistema 4x4 no protótipo, foi construída uma caixa de acoplamentos de eixos, cuja função é permitir o engate e desengate do conjunto de tração dianteira. A fabricação é uma etapa essencial para transformar o projeto teórico em um componente funcional, possibilitando a validação por meio de testes e ajustes finais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Projeto e fabricação de um sistema de acoplamento de eixos da transmissão 4x4 do protótipo da equipe Caraubaja SAE.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Construir, através de ferramentas de projetos, possíveis soluções para a problemática de engate e desengate de eixos de transmissões;
- Realizar pesquisas a respeito do tema de transmissões 4x4 especificamente para baja;
- Analisar a viabilidade das possíveis soluções por meio de matrizes de escolhas, obtendo assim a melhor configuração a ser utilizada;
- Modelar no CAD a solução escolhida;
- Dimensionar e otimizar as principais peças do sistema;
- Fabricar os componentes e montar o sistema;
- Testar e verificar a confiabilidade do sistema;
- Construir uma análise de riscos de falha.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Definição de automóvel

Um automóvel é um veículo motorizado, projetado para transporte terrestre de pessoas ou cargas, que se desloca sobre pelo menos quatro rodas e não necessita de trilhos. Ele é impulsionado por um motor de combustão interna, elétrico ou híbrido, e é composto por diversos subsistemas, como:

- Elétrica;
- Suspensão;
- Carroceria;
- Freios;
- Direção
- Transmissão.

Este trabalho tem como foco o módulo de acoplamento de eixos, com uma abordagem específica sobre o subsistema de transmissão. Em Naunheimer (2011) apresenta e descreve os diferentes sistemas de transmissão, detalhando seu funcionamento, suas aplicações e sua evolução histórica.

2.2 Transmissão

Segundo Naunheimer et al. (2011), o sistema de transmissão, é responsável por transferir a potência do motor para as rodas, ajustando o torque e a velocidade para melhorar o desempenho do veículo. Esse sistema consiste, em uma série de componentes, como embreagens, engrenagens, eixos e diferenciais, que trabalham em conjunto para regular a rotação e a força entregues às rodas motrizes. A principal função desse sistema é adaptar a rotação do motor às diversas condições de condução, permitindo que o veículo acelere, mantenha a velocidade e opere de forma eficiente, independentemente das variações de carga e terrenos.

O sistema de transmissão também oferece flexibilidade para o motorista ou sistema de controle do veículo ao selecionar diferentes marchas ou modos de operação. Em velocidades mais baixas, por exemplo, uma marcha com relação de transmissão mais alta aumenta o torque, facilitando o movimento do veículo em condições de maior resistência, como subidas íngremes. Em velocidades mais altas, uma marcha com relação de transmissão mais baixa reduz o torque, mas aumenta a velocidade, permitindo que o veículo funcione de maneira mais econômica. Essa

capacidade de ajustar a relação de torque e velocidade é crucial para garantir eficiência energética, desempenho e longevidade do motor.

Então com a evolução do progresso automotivo, o avanço tecnológico e as demandas dos consumidores, resultaram em uma grande variedade de soluções para diferentes aplicações. Cada tipo de transmissão, seja ela manual, automática, de dupla composta ou (CVT) transmissão continuamente variável, apresenta características únicas que favorecem certos veículos ou estilos de condução.

A Transmissão Continuamente Variável (CVT) é um sistema projetado para oferecer uma variação contínua de velocidade, sem interrupções bruscas ou solavancos típicos dos sistemas de transmissão convencionais. Esse tipo de transmissão ajusta de maneira fluida a relação entre o motor e as rodas, permitindo que o veículo opere de forma eficiente, sem as mudanças de marcha perceptíveis em outros sistemas, como os manuais ou automáticos, Barros (2018, apud MECCIA, 2014).

Por exemplo, ações manuais oferecem maior controle e desempenho sonoro, sendo populares em veículos esportivos. Segundo Barros (2018, apud Ambrosini, 2010), os de transferências automáticas, como os CVTs, são preferidos em segmentos do mercado onde o conforto, economia e a conveniência são prioridades, proporcionando uma experiência de condução mais suave e menos exigente.

A diversificação de opções oferece aos fabricantes a capacidade de adaptar o tipo de transmissão ao perfil do consumidor, às exigências de mercado e às regulamentações locais, como as que regem a eficiência energética e emissões. Além disso, o design, da transmissão tem um impacto direto na configuração do trem de força e na imagem, que o veículo transmite ao consumidor.

Um veículo com tração nas quatro rodas, por exemplo, pode exigir um tipo de transmissão que maximize a entrega de potência e a tração, enquanto veículos compactos e urbanos podem se beneficiar do uso do CVT que garante boa eficiência e economia (Barros 2018).

A acessibilidade dessas tecnologias pelos consumidores também varia de acordo com a cultura e as expectativas de cada mercado. Em alguns países, os câmbios manuais ainda são exclusivamente preferidos, enquanto em outros, há uma clara preferência por soluções automáticas. Esses fatores demonstram que a escolha da transmissão não é meramente técnica, mas também estratégica, pois impacta diretamente a competitividade de um modelo no mercado.

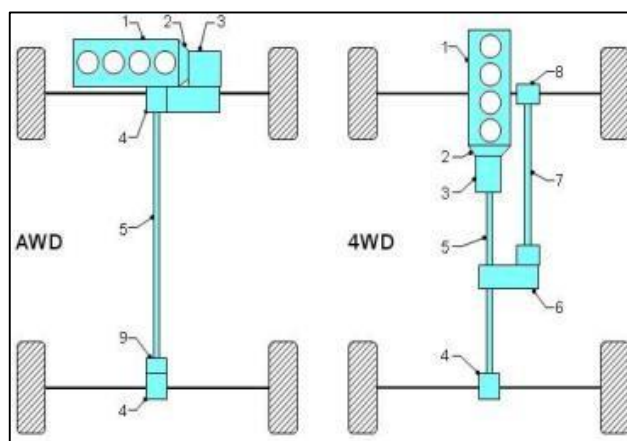
2.2.1 Tipos de transmissão

A transmissão de um veículo é constituída principalmente por um motor, no qual converte energia colorífica que é gerada pela combustão dos combustíveis, transformando-a em energia mecânica que é utilizada para o movimento do veículo. Essa energia mecânica é transmitida a sistemas específicos de cada tipo de veículo.

Existem diferentes tipos de transmissão para veículos com tração 4x2 e 4x4, cada um adequado a diferentes usos. De acordo com Gill, Sehdev e Singh (2018) a transmissão 4x2 pode ser de tração dianteira FWD (*Front Wheel Drive*), em que a potência vai para as rodas da frente, proporcionando economia de combustível e simplicidade, ou de tração traseira RWD (*Rear Wheel Drive*), em que as rodas traseiras recebem a potência, este sistema é comum em veículos esportivos e de maior desempenho.

A Figura 1 representa a transmissão 4x4 em dois arranjos diferentes. Esse tipo de transmissão distribui a potência para todas as rodas, sendo dividida entre AWD (*All-Wheel Drive*), que ativa a tração integral automaticamente ou de forma contínua, ideal para terrenos variados, e 4WD (*Four-Wheel Drive*), onde o motorista pode selecionar a tração nas quatro rodas, útil para terrenos off-road e com modos de alta ou baixa velocidade.

Figura 1- Estruturas de transmissões AWD e 4WD.



Fonte: Adaptado de Gill, Sehdev e Singh (2018).

1) Motor de combustão interna, 2) Embreagem / Conversor de torque, 3) Caixa de velocidades, 4) Diferencial traseiro, 5) Eixo da hélice traseira (longitudinal), 6) Caixa de transferência [com diferencial central e redutor de engrenagem (opcional)], 7) Eixo da hélice dianteira (longitudinal), 8) Diferencial, 9) Dispositivo de acoplamento (viscoso, eletromagnético).

Segundo GAIOTTO (2000), automóveis equipados com tração nas quatro rodas apresentam uma probabilidade reduzida de perda de aderência em superfícies de baixa tração,

como terrenos úmidos, lama ou areia, quando comparados aos veículos de tração 4x2. Isso contribui para maior estabilidade e evita paradas indesejadas do veículo.

Um sistema de transmissão eficiente deve minimizar ao máximo as perdas de energia, garantindo a transferência ideal da potência gerada pelo motor para as rodas. Além disso, é fundamental que esse sistema proporcione um alto nível de conforto ao condutor, eliminando quaisquer vibrações e ruídos que possam comprometer a experiência de dirigibilidade. A confiabilidade também desempenha um papel essencial, garantindo um desempenho consistente e seguro ao longo do tempo. Outro aspecto crítico é a durabilidade, pois a transmissão deve ser capaz de suportar esforços mecânicos intensos e variações térmicas sem comprometer sua funcionalidade.

2.2.2 Transmissões de veículos terrestres

Se a transmissão é quem interliga as rodas com a potência fornecida pelo motor. Então pode ter automóveis com motor da parte dianteira do carro e outros com o motor na parte traseira. Nos sistemas de transmissão convencionais 4x2, a presença ou ausência de eixos cardan depende diretamente da configuração da tração e da posição do motor. Em muitos casos, a tração está localizada no mesmo eixo onde o motor está montado, eliminando a necessidade de um sistema de transmissão longitudinal. Isso ocorre principalmente nos veículos com tração dianteira FWD, nos quais o diferencial e a caixa de câmbio estão integrados ao conjunto motriz, resultando em menor peso, melhor aproveitamento do espaço interno e maior eficiência mecânica.

Por outro lado, nos veículos com tração traseira RWD, a necessidade do eixo cardã depende da localização do motor no veículo. Quando o motor está posicionado na traseira ou na posição central, o eixo cardan é dispensado, pois a potência é transmitida diretamente às rodas motrizes. No entanto, nos veículos com motor dianteiro e tração traseira – configuração comum em veículos de alto desempenho, caminhonetes e carros esportivos – um eixo cardan se torna essencial para transferir torque do motor para o diferencial traseiro. Que segundo Rajamani (2012), essa configuração fornece melhor distribuição de peso, maior capacidade de carga e desempenho sonoro aprimorado, especialmente em condições de alta potência e torque.

Mas também existem carros que utilizam de outros sistemas de tração, como AWD e 4WD, entre outras.

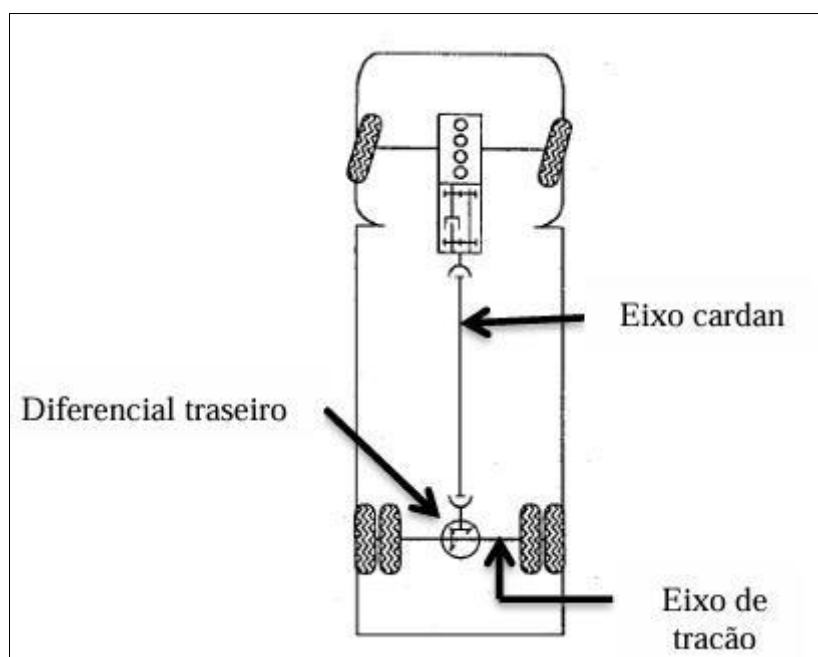
2.2.3 Tração 2WD

Em veículos com a designação 4x2 (Figura 2), refere-se a um automóvel que possui quatro rodas, mas o torque é aplicado em duas delas. O primeiro número “4” indica o total de

rodas no veículo, enquanto o segundo “2” se refere ao número de rodas que recebem potência do motor. No caso do 4x2, a força do motor é direcionada apenas para um par de rodas, que pode ser tanto o conjunto dianteiro (configuração de tração dianteira) quanto o traseiro (tração traseira), segundo Crolla 2009.

Essa distribuição de potência afeta o comportamento do veículo em diferentes condições de estrada, com cada configuração oferecendo suas próprias vantagens em termos de estabilidade, manobrabilidade e eficiência.

Figura 2- Ilustração de um sistema 2WD.



Fonte: Traduzido de Lechner e Naunheimer (1999).

2.2.3.1 Tração AWD

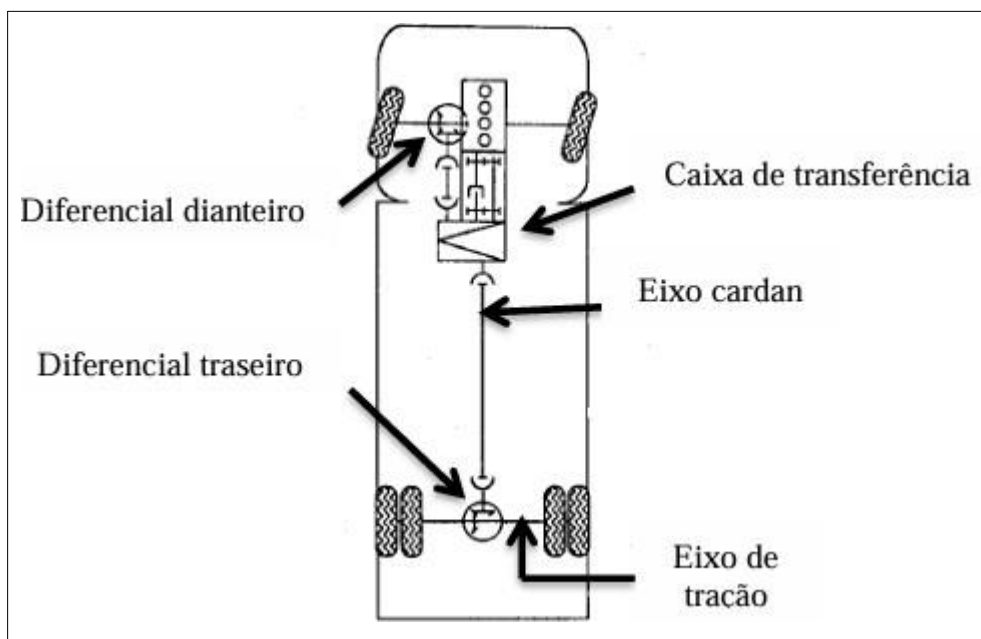
A tração AWD (*All-Wheel Drive*), ou tração integral, para Nicolazzi (2004) é um sistema de tração muito utilizado no segmento de carros esportivos, especialmente os de alto desempenho. É cada vez mais comum o uso de sistemas de tração integrais e diferenciais com escorregamento gerenciado eletronicamente por microprocessadores. Essa tecnologia se mostra especificamente eficiente em veículos projetados para condução esportiva ou para operar em superfícies de baixa aderência, como estradas congeladas ou terrenos sem pavimentação. Pois ao distribuir de forma inteligente a força motriz entre as rodas, esses sistemas melhoram a capacidade de absorção das forças laterais, permitindo que o veículo contorne curvas em velocidades mais elevadas com maior estabilidade e controle.

Crolla (2009) também afirma que veículos que utilizam deste tipo de tração podem ser considerados mais seguros, pois muitos automóveis com controle de tração que utilizam o princípio AWD funcionam combinando o envio de força para todas as rodas com sensores e eletrônica avançada para monitorar a aderência de cada uma delas em tempo real.

2.2.3.2 Tração Part Time 4WD

Nos sistemas de tração nas quatro rodas Part Time 4WD (Figura 3), o piloto tem controle sobre quando ativar ou desativar a tração nas quatro rodas, alternando entre os modos 4x2 e 4x4 conforme necessário Gill, Sehdev e Singh (2018). Em condições normais de condução, o motorista pode optar pelo modo 4x2, onde a potência é enviada apenas para duas rodas, geralmente as traseiras.

Figura 3- Ilustração do conceito de transmissão 4x4.



Fonte: Traduzido de Lechner e Naunheimer (1999).

No entanto, ao enfrentar terrenos difíceis ou escorregadios, o piloto pode ativar manualmente o modo 4x4, distribuindo o torque do motor para as quatro rodas. Isso reduz pela metade a força de tração entregue a cada pneu, o que, conforme apontado por Crolla 2009, diminui a tendência de patinagem das rodas e aumenta a aderência. Para evitar o acúmulo de torque na linha de transmissão durante o uso prolongado da tração integral, a maioria dos sistemas 4WD modernos inclui diferenciais centrais ou embreagens, que permitem que as rodas dianteiras e traseiras girem a velocidades diferentes. Essa flexibilidade de controle garante que

o piloto possa otimizar o desempenho do veículo tanto em estradas pavimentadas quanto em terrenos acidentados, alternando entre os modos 4x2 e 4x4 conforme a necessidade.

2.2.3.3 Transmissão de um protótipo tipo baja SAE

O baja SAE é um carro off-road produzido por estudantes de instituições de ensino para participar de competições de engenharia mecânica promovidas pela SAE (*Society of Automotive Engineers*). Nos anos anteriores a 2023, a SAE não exigia que os protótipos possuíssem tração nas quatro rodas, sendo então um veículo 4x2. Mas diante as novas regulamentações, a partir do ano de 2024 os veículos deverão ser equipados pelo sistema 4x4.

A transmissão em um veículo Baja SAE é um componente crítico que permite a transferência de energia do motor para as rodas, permitindo que o veículo se mova. Geralmente, os veículos Baja são de uso *off-Road* e devem ser robustos e eficientes para enfrentar terrenos variados e desafiadores. A configuração da transmissão pode variar de equipe para equipe.

Diante disto e não muito diferente de um 4x2, os protótipos 4x4 utilizam como fonte principal de potência um motor, que fornece, torque para um câmbio geralmente do tipo CVT (transmissão continuamente variável) e da mesma é fornecida para os eixos de transmissão. Isso pode ser do tipo caixa de redução por engrenagens ou do tipo pinhão coroa que é utilizada pela equipe Caraubaja SAE, e é do último eixo da redução que o torque é transferido para os eixos homocinéticos e rodas.

Gill, Sehdev e Singh (2018) também discute sobre veículos de tração 4x4 , nos quais a ativação da tração nas quatro rodas exige um sistema de acoplamento para a transmissão de torque entre os eixos. Dessa forma, além da redução e distribuição de torque para os eixos, torna-se fundamental a implementação de um mecanismo eficiente de engate e desengate da tração, garantindo melhor desempenho e eficiência conforme as necessidades do terreno.

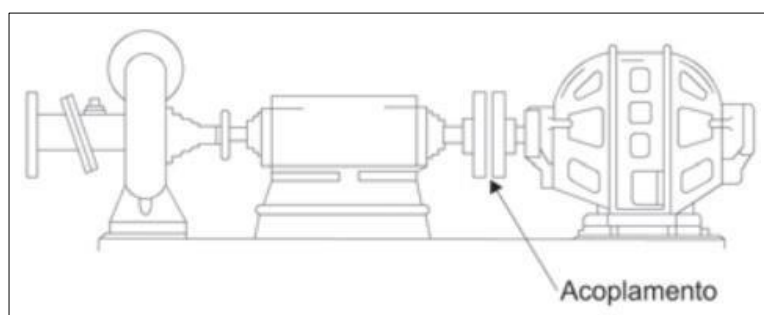
2.4 Tipos de sistemas de acoplamento

Os acoplamentos são partes fundamentais de máquinas e têm a função de transmitir potência de um eixo para outro (figura 4). São responsáveis por transmitir a energia gerada em uma parte da máquina de forma eficiente para outra, permitindo que diferentes partes do sistema trabalhem juntas de maneira sincronizada e harmoniosa.

Os acoplamentos podem ser classificados em duas categorias principais: rígidos e flexíveis. Quando os eixos estão instalados em bases fixas e bem alinhadas, é possível utilizar acoplamentos rígidos. Esses acoplamentos não permitem qualquer movimento entre o eixo de acionamento e o eixo acionado, sendo indicados para transmissões que exigem alta precisão e exatidão na transferência de torque.

Por outro lado, quando as bases estão sujeitas a esforços de tração, empenamento ou deslocamentos, é essencial utilizar acoplamentos flexíveis, também conhecidos como complacentes, para conectar os eixos. Esses acoplamentos permitem compensar desalinhamentos como: angulares; radial e axial, e também reduz tensões excessivas na transmissão de torque, Procel Indústria (2009).

Figura 4- Demonstração de um acoplamento de motor elétrico.



Fonte: Acoplamento motor carga 2009.

2.4.1 Acoplamento de engrenagens

Os acoplamentos por engrenagens são dispositivos mecânicos utilizados para transmitir torque entre eixos, permitindo uma conexão eficiente e segura. Nos cubos, há dentes externos que, ao se combinarem com os dentes internos da luva, permitem o acoplamento entre as peças. Esse acoplamento (Figura 5) é ideal para transmitir altas cargas em velocidades elevadas, já que conta com um grande número de dentes. Além disso, esse tipo de acoplamento é especialmente utilizado para compensar desalinhamentos tanto angulares quanto axiais.

Figura 5- Acoplamento por engrenagens.

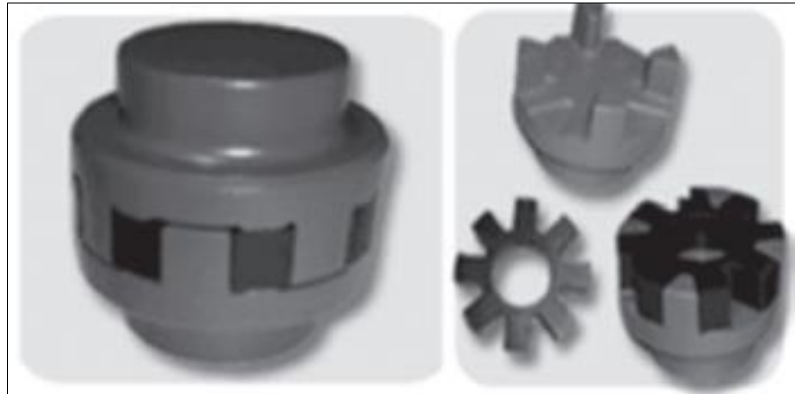


Fonte: Acoplamento motor carga 2009.

2.4.2 Acoplamentos com insertos flexíveis, tipo mandíbulas

A Figura 6 mostra dispositivos mecânicos usados para conectar dois eixos rotativos, garantindo torque entre eles de forma eficiente e com um certo grau de flexibilidade. Eles são amplamente usados para absorver desalinhamentos, choques e vibrações assim, protegendo os componentes conectados.

Figura 6- Acoplamento tipo mandíbulas.



Fonte: Acoplamento motor carga 2009.

2.4.3 Acoplamento de grade Falk

O acoplamento de grade Falk (Figura 7) é um tipo de acoplamento mecânico usado para ligar dois eixos, transmitindo torque entre eles e, ao mesmo tempo, absorve desalinhamentos e choques. É amplamente utilizado em aplicações industriais pesadas, como em sistemas de transporte, compressores, bombas e maquinários de grande porte.

Figura 7- Acoplamento de grade Falk.

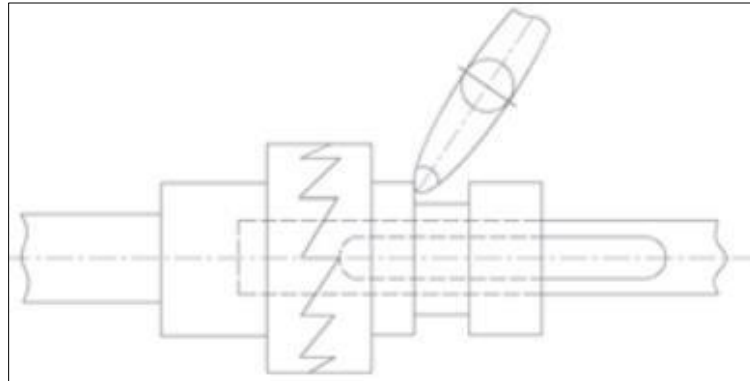


Fonte: Acoplamento motor carga 2009.

2.4.4 Acoplamentos móveis

Esses tipos de acoplamentos são usados quando é necessário transmitir torque apenas nos momentos em que forem ativados, Figura 8. O acionamento pode ser feito de forma manual ou automática, conforme a necessidade.

Figura 8- Acoplamento móvel.

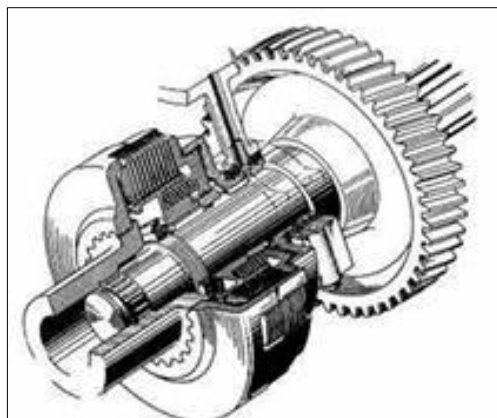


Fonte: Acoplamento motor carga 2009.

2.4.4.1 Acoplamento por embreagem de fricção

Embreagem de fricção utiliza discos que, ao serem comprimidos entre si, transmitem torque de maneira progressiva e controlada (Figura 9). Quando o piloto libera a alavanca, o conjunto de discos é comprimido, permitindo a transferência de potência entre os eixos. Esse sistema, no entanto, é suscetível a fatores externos, como poeira, água e lama, elementos comuns em competições off-road, o que pode comprometer o desempenho e a durabilidade do sistema.

Figura 9- Embreagem multidiscos.

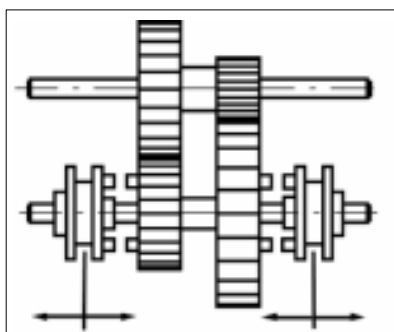


Fonte - Naunheimer (2011).

2.4.4.2 Embreagem (acoplamento) do tipo cachorro (*dog clutch*)

No final do século XVIII, James Watt, conhecido por suas contribuições à Revolução Industrial, registrou uma patente em 1784 para um mecanismo de engrenagem de engate constante (*dog clutch*), Figura 10. Esse sistema usava rodas dentadas que permaneciam em contato contínuo, permitindo a transmissão de movimento de maneira suave e eficaz. A introdução desse tipo de engrenagem representou um passo importante no desenvolvimento de transferência de velocidade variável, conceito que se tornaria a base para muitas das tecnologias de transmissão usadas em máquinas e veículos até os dias atuais Naunheimer (2011).

Figura 10- Embreagem cachorro.



Fonte - Naunheimer (2011).

A embreagem do tipo "cachorro" (*dog clutch*) Figura 11, é um mecanismo de acoplamento mecânico que é amplamente utilizado em transmissões para conectar e desconectar eixos, sem a necessidade de deslizamento como ocorre nas embreagens de fricção. De acordo com Naunheimer (2011), o princípio de operação dessa embreagem baseia-se no engate direto de dentes ou saliências entre dois componentes, o que possibilita uma transferência de torque positiva e precisa.

Os cinco principais características da embreagem (acoplamento) tipo cachorro são:

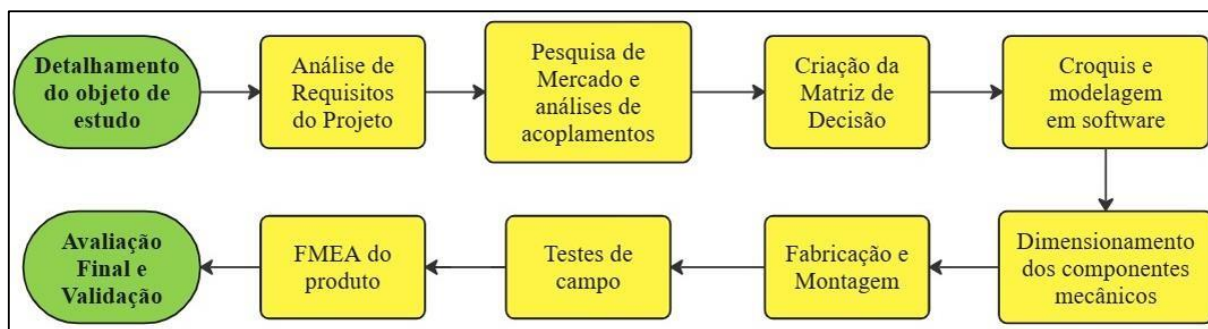
- **Engate positivo:** Diferente de embreagens de fricção, este tipo de embreagem por cachorro usa dentes que se encaixam diretamente para transmitir torque. Isso resulta em uma conexão rígida e eficaz, sem deslizamento.
- **Operação "On/Off":** Este tipo de embreagem é normalmente usada em sistemas que exigem uma acoplamento/desacoplamento direto, como em caixas de transmissão manuais, onde o eixo de entrada e o de saída são rigidamente conectados quando acoplados. No entanto, não permite um controle fino de deslizamento.

- **Engate sincronizado:** Para evitar danos durante o acoplamento, a embreagem tipo "cachorro" costuma ser utilizada junto a anéis de sincronização ou mecanismos de controle. Esses sistemas garantem que as rotações dos eixos estejam próximas ou iguais no momento do engate. O sincronizador é especialmente importante em sistemas que operam com rotações mais altas.
- **Durabilidade e Simplicidade:** Por não conter com componentes que sofrem desgaste constante por atrito, a embreagem tipo cachorro costuma ter uma vida útil maior e exigir menos manutenção, o que a torna uma ótima escolha para aplicações que demandam alta durabilidade

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia apresentada neste projeto segue uma abordagem sistemática e organizada, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 11, a fim de garantir que todas as etapas do desenvolvimento de um produto sejam executadas de maneira eficiente e consistente.

Figura 11- Fluxograma do processo.



Fonte: Própria autoria.

Inicialmente, há o detalhamento do objeto de estudo, seguido da análise dos requisitos do projeto, que define os parâmetros técnicos necessários para o correto funcionamento do acoplamento.

Posteriormente, é realizada uma pesquisa de mercado e análise de acoplamentos, visando identificar as opções disponíveis e adequadas para o sistema em desenvolvimento. Com base nas informações obtidas, é criada uma matriz de decisão para auxiliar na escolha do tipo de acoplamento ideal, considerando fatores como desempenho, custo e viabilidade técnica.

Após a escolha do acoplamento, passa-se para a fase de croquis e modelagem em software, onde o sistema é projetado virtualmente para análise e validação preliminar. Simultaneamente, é feito o dimensionamento dos componentes mecânicos e a análise de FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), garantindo que possíveis falhas sejam identificadas e mitigadas durante o processo de desenvolvimento.

Com o projeto finalizado e as análises completadas, o sistema entra na fase de fabricação e montagem. Em seguida, são conduzidos testes de campo, onde o acoplamento e o sistema completo são avaliados em condições reais de uso, simulando as demandas das competições.

Por fim, ocorre a avaliação final e validação, onde os resultados dos testes são analisados, e o sistema é ajustado e validado para garantir que atenda a todos os requisitos previamente estabelecidos, concluindo assim o desenvolvimento do acoplamento.

3.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo deste trabalho (Figura 12) é o protótipo de um veículo tipo Baja SAE, pertencente à equipe Caraubaja SAE, que ingressou no ano de 2015 nas competições Baja SAE. Até o ano de 2023, a equipe havia desenvolvido um protótipo 4x2, mas com a mudança nas regulamentações e visando maior competitividade, um novo projeto de um veículo 4x4 foi idealizado.

Figura 12- Protótipo do Caraubaja (objeto de estudo).



Fonte: Própria autoria.

O veículo possui uma suspensão independente do tipo duplo A, tanto na dianteira quanto na traseira. Segundo Diniz (2014), esse sistema de suspensão oferece maior capacidade de absorção de impactos e estabilidade em terrenos irregulares, características fundamentais para as condições de prova no Baja SAE. O protótipo apresenta uma bitola de 1330 mm, distância entre eixos de 1450 mm e uma distância de vão livre de 340 mm sem o piloto, conferindo ao carro uma configuração estável e com boa altura para transpor obstáculos.

No sistema de direção, foi utilizado um mecanismo de cremalheira e dois pinhões, que garante precisão no controle da trajetória em situações *off-road*. O sistema de freios é composto por discos nas rodas dianteiras com acionamento individual e uma pinça única no eixo traseiro, garantindo controle adequado da frenagem.

O sistema de transmissão do protótipo 4x2 da equipe Caraubaja é projetado para otimizar a entrega de torque e garantir o máximo desempenho em terrenos *off-road*. Ele começa com o motor Honda GX390H1 QHBR, que gera um torque máximo de 25,11 N.m a 2500 RPM. Esse torque é transferido para o CVT Gaged Gx9, que é uma transmissão continuamente variável, com uma relação de transmissão variando de, 3,9:1 (para maximizar o torque em baixas velocidades) até 0,9:1 (para otimizar a eficiência em velocidades mais altas).

O uso do CVT é estratégico, pois elimina a necessidade de trocas manuais de marcha, proporcionando uma operação mais suave e eficiente. Além disso, o sistema de transmissão utiliza um conjunto de pinhão e coroa com correntes de rolo, com uma relação final de 5,3:1, amplificando o torque e resultando em uma força trativa nas rodas de 2452,9 N.

Este protótipo 4x2 serviu, como base para o desenvolvimento da equipe, que visa a implementação de um sistema 4x4, capaz de otimizar tração e desempenho do veículo nas competições futuras. Visando a implementação de um sistema de tração 4WD, torna-se necessário desenvolver um sistema de acoplamento de eixos que seja funcional, simples e eficiente, atendendo às demandas técnicas e dinâmicas do projeto.

A transição para um sistema de tração 4WD (4x4) exigirá ajustes no sistema de transmissão para distribuir o torque de forma equilibrada entre as quatro rodas. Isso implicará na incorporação de diferenciais e eixos de transmissão adicionais, mantendo a eficiência e robustez do sistema atual.

3.2 Análise de mercado

A partir deste ponto, inicia-se uma pesquisa aprofundada, em oficinas mecânicas de motos e carros, visando obter a ideia para alcançar os objetivos propostos no projeto. Uma primeira fase consiste em uma análise minuciosa do mercado, em que é possível conversar com profissionais especializados, nesta conversa foi pedido para o mesmo demonstrar na prática o sistema de acoplamento das engrenagens, com isto verificado diretamente o funcionamento dos sistemas de acoplamentos utilizados em carros, incluindo os sistemas de acoplagem de tração em veículos 4x4, tais como Toyota HILUX e Chevrolet S10, entre outros modelos dessa categoria. Também se ampliou a pesquisa para incluir a análise das caixas de marcha de motos, onde seria possível analisar o sistema de acoplamento das engrenagens da caixa de marcha, buscando inspiração e ideias. Também foi visto trabalhos relacionados ao assunto como artigos dissertações monografias tese assim como patentes.

Essas interações permitiram uma compreensão mais aprofundada das características construtivas, dos desafios mecânicos envolvidos e das possíveis adaptações para aplicação no contexto do projeto.

Com base nos insights obtidos dessa pesquisa ampliada, a seleção da melhor proposta foi realizada por meio de uma matriz de decisão, fundamentada na metodologia de Norton (2011). Esse processo envolve uma avaliação técnica, atribuindo pesos e notas a critérios específicos, de modo que a opção com a maior média ponderada seja identificada como a mais adequada.

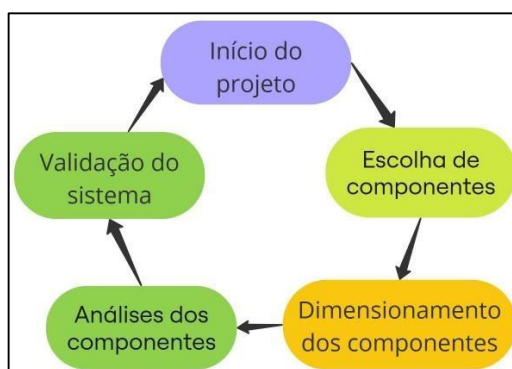
Então foram adotados os seguintes critérios de avaliação, variando de 0 a 10, classificando o desempenho dos critérios em três faixas distintas: Ruim (0 a 5), Bom (5 a 7) e excelente (7 a 10). Esse método fornece uma análise mais objetiva e intuitiva, permitindo uma comparação mais clara entre as diferentes opções avaliadas. A categorização, facilita a interpretação dos resultados, destacando de forma precisa os pontos fortes e fracos de cada alternativa, Estudo de Propostas Para Um Sistema de Tração 4X4 em Um Veículo do Tipo Baja Sae (2020).

Além disso, essa estrutura permite uma melhor fundamentação na escolha do acoplamento para o sistema de transmissão 4WD, garantindo que os fatores essenciais, como durabilidade, eficiência na transmissão de torque e robustez em ambientes *off-road*, sejam considerados de maneira equilibrada e fundamentada. Isso favorece o dimensionamento correto dos componentes.

3.3 Modelagem do protótipo

Para o desenvolvimento do sistema de acoplamento, foram seguidas as práticas de modelagem de produto Figura 13, que envolvem o estudo de requisitos, geração de conceitos, prototipagem virtual e, finalmente detalhamento técnico.

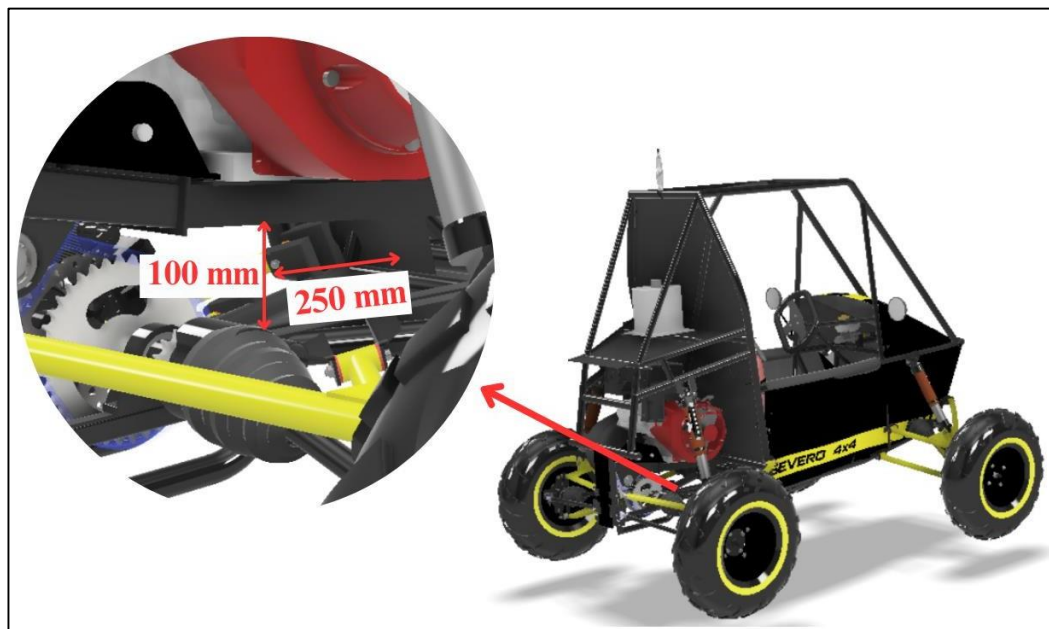
Figura 13- Ciclo das práticas de modelagem do produto.



Fonte: Própria autoria.

Inicialmente, foram realizados esboços com base nos requisitos de espaço disponíveis no veículo Figura 14, onde a caixa de acoplamento seria instalada.

Figura 14- Ilustração do espaço disponível para a caixa de acoplamento.



Fonte: Própria autoria.

Vale enfatizar que, ao modelar um produto, é essencial considerar não apenas a funcionalidade, mas também fatores como durabilidade, facilidade de fabricação, manutenção e integração com outros sistemas. Nesse sentido, foi utilizado o software autodesk inventor para modelagem das peças e montagem do equipamento.

Assim dentro desse contexto, este trabalho irá abordar como fonte principal o sistema de acoplamento de eixos, em virtude de desenvolver um protótipo capaz de superar diversos obstáculos e várias situações adversas dentro e fora do ambiente de competição.

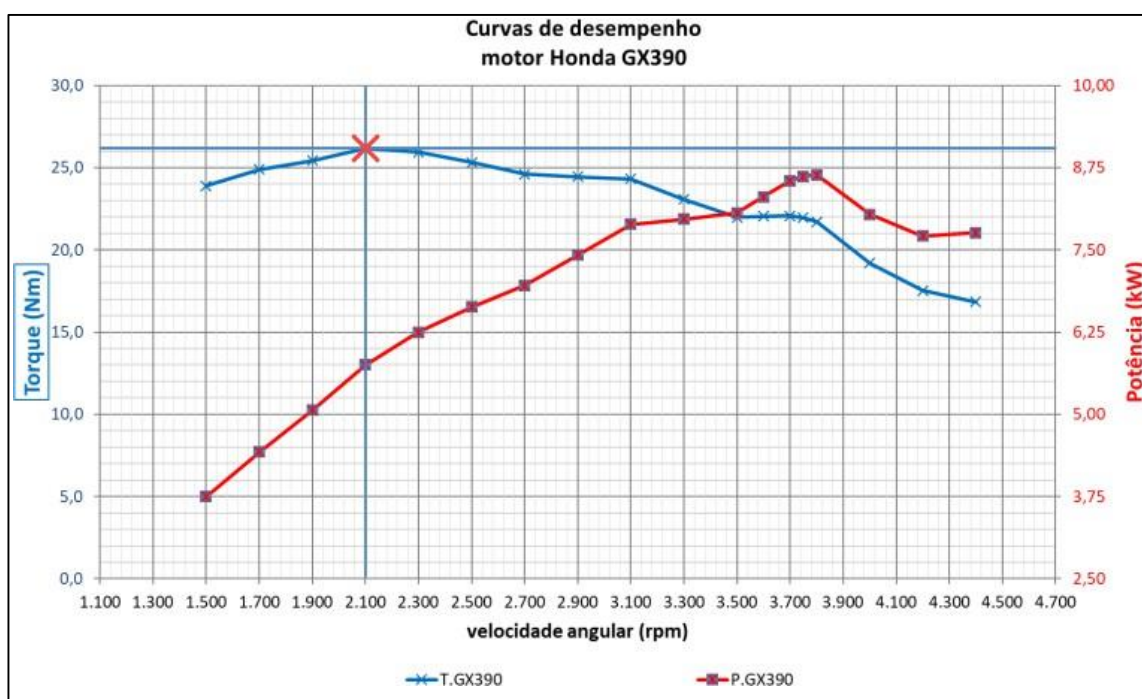
3.4 Dimensionamento dos componentes

Para o dimensionamento dos componentes mecânicos do acoplamento deve-se considerar o torque de saída do terceiro eixo da transmissão. Para isso, é essencial analisar o torque fornecido pelo motor e a relação de aumento de torque proporcionada pela transmissão continuamente variável (CVT) também pela relação fixa de pinhão coroa. Com base nessa análise, é necessário realizar o dimensionamento dos eixos da transmissão, garantindo assim uma base sólida para o projeto. As diretrizes para esse dimensionamento foram fundamentadas na literatura de Robert L. Norton (Projetos de máquinas “UMA ABORDAGEM

INTEGRADA” 2013 4ª edição) e, Elemento de Máquinas de Shigley (Projeto de Engenharia Mecânica, 2011 8ª edição), essas literaturas fornecem uma abordagem abrangente para o projeto de sistemas de transmissão.

O Gráfico 1, representa as curvas de desempenho do motor Honda GX390 , ilustrando a relação entre a velocidade angular (rpm) e duas das grandezas mais importantes para a análise do seu funcionamento: o torque (Nm) e a potência (kW) . Essas curvas são fundamentais para compreender o comportamento do motor em diferentes regimes de operação, permitindo identificar sua eficiência e faixa ideal de utilização.

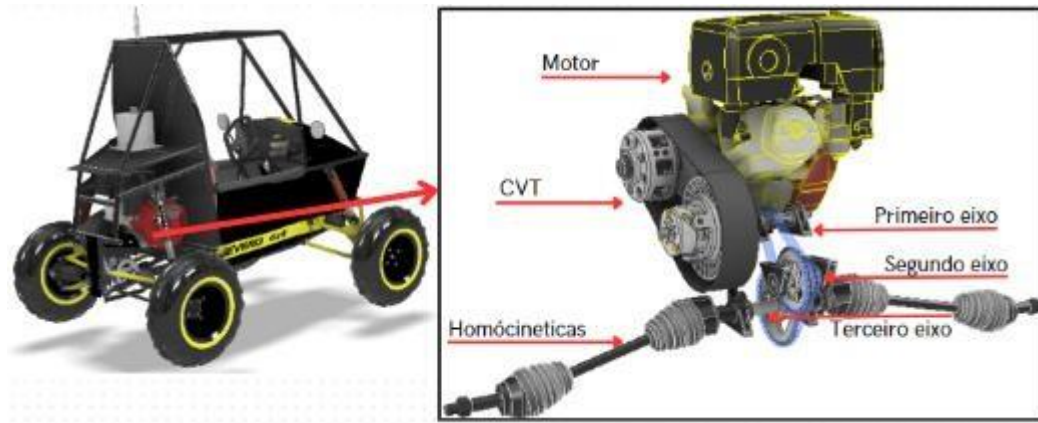
Gráfico 1- Curvas de desempenho motor Honda GX390.



Fonte: Adaptado de Ensaio em motores de combustão interna.

Também é essencial identificar com precisão os componentes da transmissão (Figura 15) que serão utilizados nos cálculos de dimensionamento. Essa etapa garante que cada eixo do sistema, seja corretamente considerado na análise, permitindo um projeto mais eficiente e confiável.

Figura 15 – Sistema de transmissão 4x2 do Caraubaja SAE.



Fonte: Própria autoria.

Já que a relação de transmissão é conhecida e tem-se os parâmetros de potência e velocidade angular para o torque máximo do motor, então é possível obter o torque em cada eixo da transmissão.

Os dados de potência, velocidade angular e torque máximo do motor é baseado no gráfico 1:

- **Potência do motor Honda GX390H1 QHBR:** $P_{Tmáx}=5,561 \text{ kW}$; $T_{máx}=26,11 \text{ N.m}$;
- **$\omega_{máx}= 2100 \text{ rpm}$;**
- **Redução CVT= 3,90:1;**
- **Torque no primeiro eixo:** $T_{e1} = 26,11 * 3,90 = 101,83 \text{ N.m}$;
- **Torque no segundo eixo:** $T_{e2} = 254,57 \text{ N.m}$;
- **Torque no terceiro eixo:** $T_{e3} = 744,13 \text{ N.m}$;
- **Fator de segurança = 3**

O dimensionamento dos eixos foram obtidos pelas equações a seguir:

Para encontrar as tensões admissíveis dos aços usa-se a seguinte equação:

$$T_{adm} = \frac{\sigma}{F_s} \quad (1)$$

Sendo:

T_{adm} = Tensão admissível ;

σ = Tensão máxima (ou tensão de ruptura);

F_s = Fator de segurança.

Cálculo do momento torçor:

$$Mt = \frac{30000}{\pi} * \frac{P}{\omega} \quad (2)$$

Sendo:

M_t = momento torçor;

P = potência;

π = Pi (constante matemática);

ω = velocidade angular.

Força tangencial:

$$F_t = \frac{M_t}{r} \quad (3)$$

Sendo:

F_t = força tangencial;

r = raio.

Momento resultante:

$$M_r = F_t * \frac{x * y}{x + y} \quad (4)$$

Sendo:

M_f = momento fletor;

F_t = força tangencial;

x = Distância do ponto de aplicação da **F_t** até o primeiro ponto de apoio do eixo;

y = Distância do ponto de aplicação da **F_t** até o segundo ponto de apoio do eixo.

Momento ideal:

$$M_i = \sqrt{(M_f)^2 + \left(\frac{\alpha}{2} * M_t\right)^2} \quad (5)$$

Sendo:

M_i = momento ideal;

α = fator de correção relacionado às dimensões da peça e às condições de carregamento.

Cálculo do diâmetro do eixo:

$$d = 2,17 \sqrt[3]{\frac{M_i}{\sigma_{tração}}} \quad (6)$$

Sendo:

d = diâmetro;

σ_{tração} = Tensão de tração admissível.

Para encontrar os diâmetros mínimos necessários usa-se a seguinte equação:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 * T}{\pi * \sigma_{adm}}} \quad (7)$$

Sendo:

T = torque no eixo;

π = Pi (constante matemática).

Dimensionamento das engrenagens

Antes de proceder com o dimensionamento das engrenagens, é fundamental definir as parâmetros operacionais e materiais envolvidos no projeto. A seleção dos materiais levou em consideração critérios de resistência, durabilidade e capacidade de suportar as cargas geradas pela transmissão.

Então com base nos métodos de dimensionamento apresentados por Shigley, Mischke e Budynas (2006) e Norton (2013), as engrenagens foram dimensionadas utilizando as equações a seguir.

Parâmetros de entrada:

- Torque no terceiro eixo (T): 715 N.m
- Velocidade angular no terceiro eixo (ω_3): 74 rpm
- Vida Útil: ≥ 1000 horas
- Fator de segurança (Fs): 3

Cálculo do Módulo (m)

O módulo é calculado usando a relação entre o diâmetro primitivo (d) e o número de dentes (z):

$$m = \frac{d}{z} \quad (8)$$

Fator de durabilidade (w)

$$w = \frac{60 * N_P * h}{10^6} \quad (9)$$

N_p = velocidade angular da engrenagem;

h = horas de uso.

Tensão Admissível (σ_{adm})

Para calcular a tensão admissível com um fator de segurança (Fs) de 3:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{F_s} \quad (10)$$

σ_y = limite de escoamento.

Volume mínimo da engrenagem

$$b_1 * d_{01}^2 = 5,72 \times 10^5 * \frac{M_T}{P_{adm}^2} * \frac{u \pm 1}{i \pm 0,14} * \varphi \quad (11)$$

Força Tangencial nos dentes da engrenagem (F_T)

A força tangencial é calculada usando a fórmula:

$$F_T = \frac{T}{r} \quad (12)$$

Raio Efetivo (r)

Raio efetivo é metade do diâmetro primitivo (d):

$$r = \frac{d}{2} \quad (13)$$

Verificação da Capacidade dos Dentes

Tensão de cisalhamento (σ_c)

A tensão de cisalhamento nos dentes pode ser calculada usando a fórmula:

$$\sigma_c = \frac{F_T}{A * Z} \quad (14)$$

Onde:

A = área de contato dos dentes;

Z = quantidade de dentes.

A área de contato (A) para cada dente é dada por:

$$A = B * L_F \quad (15)$$

B = Largura dos Dentes no sentido da circunferência;

L_F = Largura da face do dente.

Limite de Fadiga

Para garantir uma vida útil duradoura sob condições cíclicas, precisa-se garantir que a tensão de compressão fique abaixo do limite de fadiga do material.

Pode-se citar para exemplo o limite de fadiga para o aço SAE 4340 é aproximadamente 500 MPa.

$$\sigma_c \leq 500MPa$$

Portanto, rearranjando a fórmula para h:

$$h \geq \frac{F_T}{\sigma_c * B} \quad (16)$$

h = altura nova do dente.

Frequência das Cargas Cíclicas:

A análise da frequência de cargas cíclicas é essencial para prever falhas por fadiga e dimensionar corretamente os elementos para garantir segurança e durabilidade.

Com uma velocidade de 88 rpm, o número de ciclos em 1000 horas pode ser calculado como:

$$Ciclos = rpm \times \frac{60min}{hora} \times horas\ de\ vida\ estimada \quad (17)$$

3.5 Descrição da etapa de fabricação e montagem do sistema de acoplamento

A fabricação tem como objetivo transformar o projeto em realidade, concretizando as ideias concebidas no desenvolvimento. É por meio desse processo que o projeto ganha forma física, possibilitando a realização dos testes necessários para sua validação e ajustes finais, garantindo sua funcionalidade e eficiência.

O processo de fabricação para eixos e engrenagens, a ser utilizado é a usinagem de precisão em CNC, assim garantindo um alto nível de exatidão dimensional e acabamento superficial, garantido o ajuste ideal. Além disso, foram empregadas técnicas de fabricação convencional, como operações realizadas em torno mecânico e fresadora para a fabricação dos componentes da caixa de acoplamento. O processo também envolve o uso de solda com eletrodo revestido, furadeira de bancada, esmerilhadeira e outras ferramentas auxiliares para a montagem e acabamento das peças.

Além disso, as engrenagens e eixos requerem tratamentos térmicos para aprimorar suas propriedades mecânicas, aumentando a resistência ao desgaste e à fadiga. Os métodos mais

comum são cementação, para melhorar a dureza superficial e a resistência ao desgaste, e depois revenimento, para reduzir as tensões internas e aumentar a tenacidade do material, garantindo maior durabilidade e desempenho do conjunto.

3.6 FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)

O FMEA foi aplicado na análise da caixa de integração de eixos com o objetivo de identificar possíveis falhas no funcionamento do sistema 4x4, avaliando seus impactos e propondo soluções preventivas. A metodologia permitiu antecipar problemas e melhorar a confiabilidade do projeto antes da fabricação e testes. Durante a aplicação, os seguintes pontos foram analisados:

- **Identificação do Componente:** A análise foi direcionada à caixa de acoplamento de eixos, considerando engrenagens, eixos e demais elementos estruturais.
- **Modo de Falha:** Foram avaliados possíveis problemas, como desgaste excessivo das engrenagens, desalinhamento dos eixos, falhas nas soldas das fixações e dificuldades no acionamento do sistema.
- **Efeitos da Falha:** As consequências potenciais incluíram perda de eficiência na transmissão de torque, falha no engate do 4x4, aumento do atrito interno e desgaste prematuro dos componentes.
- **Causas Potenciais:** Entre os fatores que podem levar a essas falhas, destacam-se o uso de materiais inadequados, erros no processo de usinagem, falhas na montagem e lubrificação insuficiente.
- **Deteção:** Foram estabelecidos métodos de inspeção e testes para verificar a integridade dos componentes, como precisão dimensional, análise de encaixes e testes de resistência mecânica antes da montagem final.
- **Gravidade (S), Ocorrência (O) e Deteção (D):** Cada falha foi definida em escalas de 1 a 10, avaliando seu impacto, probabilidade de ocorrer e a chance de ser detectada antes de comprometer o sistema.
- **Número de Prioridade de Risco (NPR):** A multiplicação dos fatores $S \times O \times D$ permitiu priorizar as falhas mais críticas e definir ações corretivas, como ajustes no projeto, reforço estrutural e escolha de materiais mais adequados. Calculado como $NPR = S \times O \times E$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Definição do tipo de acoplamento

A escolha do acoplamento foi baseada em uma matriz de decisão (Tabela 1), conforme apresentada na metodologia, na qual diversos fatores críticos foram avaliados para determinar a melhor opção para o projeto do protótipo baja SAE.

Tabela 1- Matriz de decisão para o melhor tipo de acoplamento.

Critérios	Dog Clutch (Cachorro)	Acoplamento por Fricção	Acoplamento Grade Falk	Acoplamento de Engrenagens
Durabilidade	9	7	6	8
Eficiência na Transmissão de Torque	10	7	8	9
Facilidade de Manutenção	8	6	7	7
Robustez em Ambientes Off-Road	9	5	8	9
Compatibilidade com Sistema 4WD	9	9	0	0
Pontuação Total	9	6,8	5,8	6,6

Fonte: Própria autoria.

A partir da matriz de escolha e de análises de mercado, que incluíram uma comparação detalhada de diversos tipos de acoplamentos, a embreagem (acoplamento) do tipo cachorro (*dog clutch*) foi considerada a mais adequada para o sistema de tração 4WD do protótipo Baja SAE. Além disso, essa escolha foi ratificada quando foi comparado às qualidades de cada acoplamento analisada. A seguir são apresentados as características principais do acoplamento escolhido.

Engate direto e sem deslizamento: A embreagem "cachorro" oferece uma conexão rígida entre os componentes, utilizando dentes que se encaixam diretamente, sem o risco de deslizamento. Essa característica é fundamental para o sistema 4WD, onde é necessária uma transmissão de torque positiva e precisa entre os eixos dianteiro e traseiro. No contexto de um veículo *off-road* como o Baja SAE, a capacidade de engate direto garante que a potência seja transmitida de forma eficiente, mesmo em condições de alta resistência ou terrenos irregulares

- Robustez e durabilidade: Por ser um sistema mecânico com poucos componentes móveis e sem a necessidade de elementos de fricção, a embreagem "cachorro" oferece maior resistência ao desgaste, uma característica essencial em competições como o Baja SAE,

onde o veículo enfrenta constantemente situações extremas. A simplicidade desse design contribui para uma vida útil prolongada e reduz a necessidade de manutenção, aspectos decisivos para garantir a confiabilidade durante provas de longa duração.

- Operação "On/Off" eficiente: A embreagem "cachorro" permite o acoplamento e desacoplamento rápido e direto, o que é extremamente vantajoso em um sistema de tração 4WD. Em situações onde é necessário alternar entre modos 4x2 e 4x4, como em trechos de alta e baixa aderência, a capacidade de engate rápido sem necessidade de deslizamento oferece maior controle e resposta imediata, adaptando-se de maneira eficiente a diferentes condições de terreno.
- Compatibilidade com o sistema 4WD: Em um veículo com tração nas quatro rodas, o acoplamento "cachorro" se destaca por permitir a sincronização entre os eixos dianteiro e traseiro sem a necessidade de diferenciais complexos ou embreagens de fricção. Além disso, a capacidade de engate sincronizado, especialmente com o uso de anéis de sincronização, evita danos ao sistema, garantindo que as rotações dos eixos estejam adequadamente ajustadas antes do acoplamento.

Por fim essa escolha técnica foi fundamentada nas demandas específicas do projeto, priorizando a simplicidade, eficiência e robustez necessárias para um protótipo competitivo no ambiente rigoroso do Baja SAE.

4.2 Modelagem computacional

Para a realização da modelagem computacional, é essencial a definição das dimensões dos componentes a serem modelados. A partir das equações apresentadas na metodologia, foi possível calcular os parâmetros geométricos necessários, garantindo a fidelidade do modelo digital em relação ao projeto teórico. Os resultados obtidos foram organizados nas tabelas 2 e 3, garantindo a coerência entre os cálculos e a representação tridimensional.

Tabela 2- Dimensão da engrenagem.

Dimensão da engrenagem móvel	
	(mm)
Largura do dente	10
Altura do dente	7
Largura da face do dente	7
Diâmetro primitivo	36,5
Área de contato do dente	70 mm ²
Quantidade de dentes	6 z

Fonte: Própria autoria.

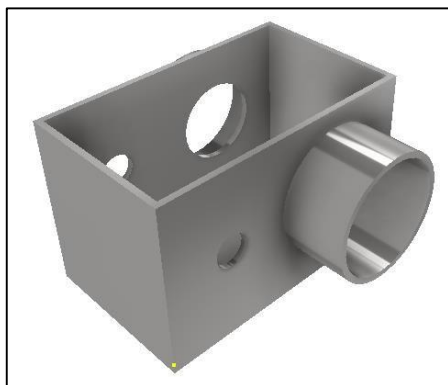
Tabela 3- Diâmetro dos eixos.

Diâmetro dos eixos	
	mm
Primeiro eixo	20
Segundo eixo	25
Terceiro eixo	25
Quarto eixo	20

Fonte: Própria autoria.

Então a partir da metodologia, definição do tipo de acoplamento e dos cálculos matemáticos, foi possível fazer modelagem tridimensional no software Autodesk Inventor, uma ferramenta amplamente utilizada na engenharia para modelagem de produtos e análise de interferências. A partir das medidas do espaço disponível (100 mm de altura e 250 mm de largura Figura 14), e das necessidades funcionais do sistema, foi criada a modelagem detalhada da caixa de acoplamento Figura 16, incorporando engrenagens, garfos, eixos e molas. A modelagem teve como foco garantir que todos os componentes fossem otimizados para resistir às cargas de torque elevadas e às condições extremas de uso.

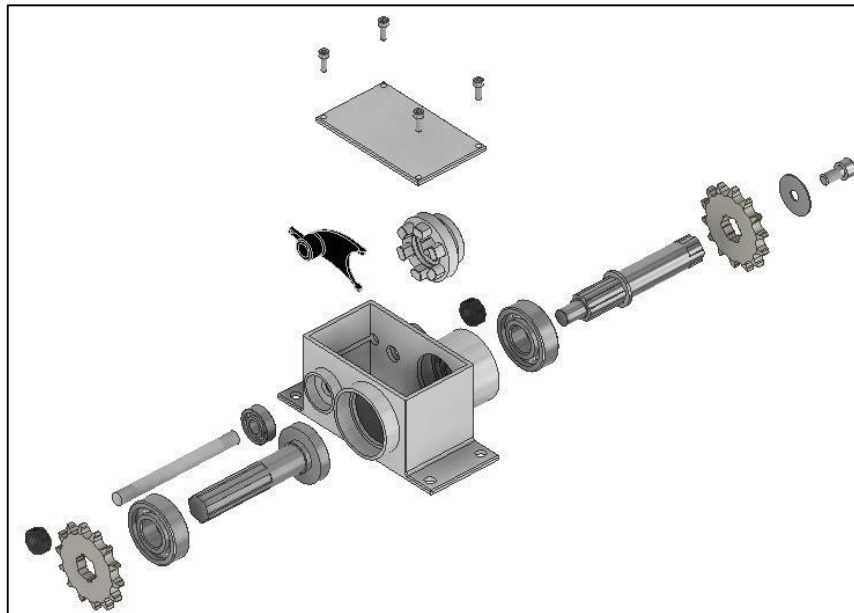
Figura 16- Caixa de acoplamento.



Fonte: Própria autoria.

Com isto, a modelagem tridimensional foi concluída, conforme ilustra na Figura 17, uma vista explodida do equipamento proporcionando uma visualização clara e detalhada do conjunto e de seus componentes. A representação em 3D permitiu uma melhor compreensão da disposição das peças e de sua relação no sistema, oferecendo uma noção realista de como o mecanismo ficaria após a fabricação. Dessa forma, foi possível antecipar a aparência final do projeto, facilitando sua análise e apresentação.

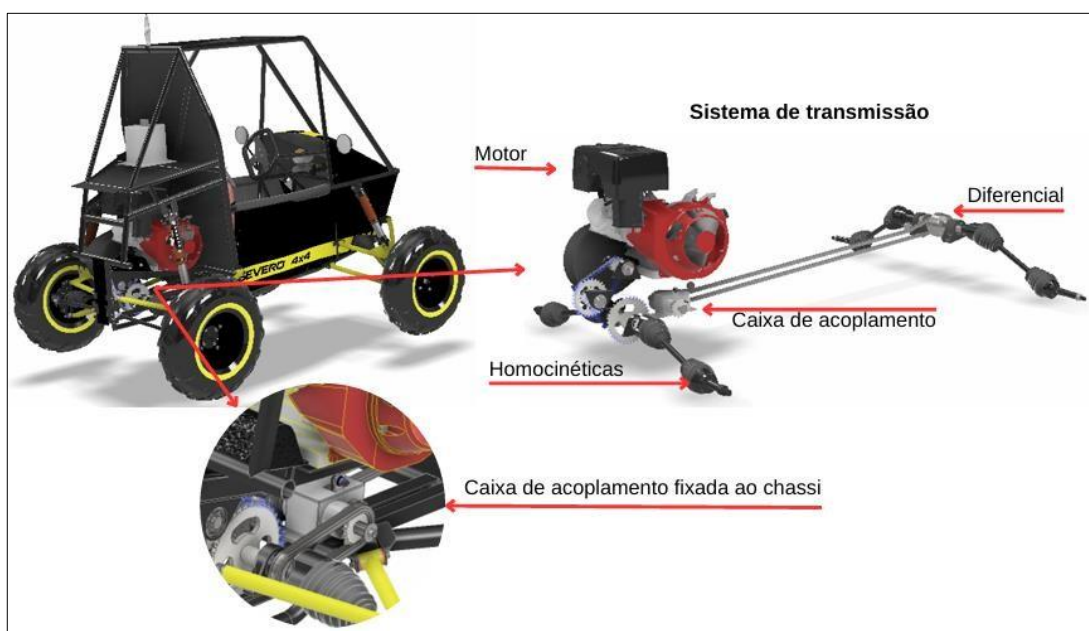
Figura 17- Vista explodida, da caixa de acoplamento e desacoplamento.



Fonte – Própria autoria

Com o projeto desenvolvido, foi realizada a montagem virtual (Figura 18) do sistema de acoplamento no protótipo utilizando o software Autodesk Inventor. Essa etapa permitiu uma visualização detalhada da integração dos componentes, possibilitando a validação da concepção antes da fabricação. Além disso, a modelagem 3D serviu como uma prévia do resultado final, auxiliando na identificação de possíveis ajustes e garantindo maior precisão na fabricação e montagem do sistema real.

Figura 18– Sistema de transmissão 4x4 do Carubaja SAE.



Fonte: Própria autoria.

4.3 Fabricação e Montagem

A fabricação da caixa que abriga todo o sistema foi realizada de forma manual e automatizada, envolvendo processos de operação, usinagem em torno mecânico e operações em máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado). Os cortes das chapas metálicas necessárias para montagem da caixa, incluindo a tampa, foram cortadas a plasma com movimentação por CNC, garantindo precisão dimensional. Após o corte, as chapas passaram por um processo de desbaste para remoção de rebarbas, melhorando e aprimorando o ajuste dimensional.

Em seguida, as chapas foram posicionadas sobre bancadas niveladas e com o auxílio de grampos do tipo sargento e esquadros, foi possível garantir o alinhamento adequado para a aplicação das soldas de fechamento (Figura 19).

Figura 19- Caixa pronta para recebimento dos mancais.



Fonte: Própria autoria.

Com o corpo principal da caixa montada, foi necessário realizar a usinagem dos mancais destinados aos rolamentos (Figura 20).

Após a usinagem, os mancais foram soldados ao corpo da caixa (Figura 21), para garantir o alinhamento entre os mancais, foi necessário montar os rolamentos nos mancais para colocar um eixo passante de um lado para o outro da caixa. Fornecendo alinhamento preciso para o funcionamento adequado do sistema.

Figura 20- Usinagem dos mancais.



Fonte: Própria autoria.

Figura 21- Caixa com os mancais soldados.



Fonte: Própria autoria.

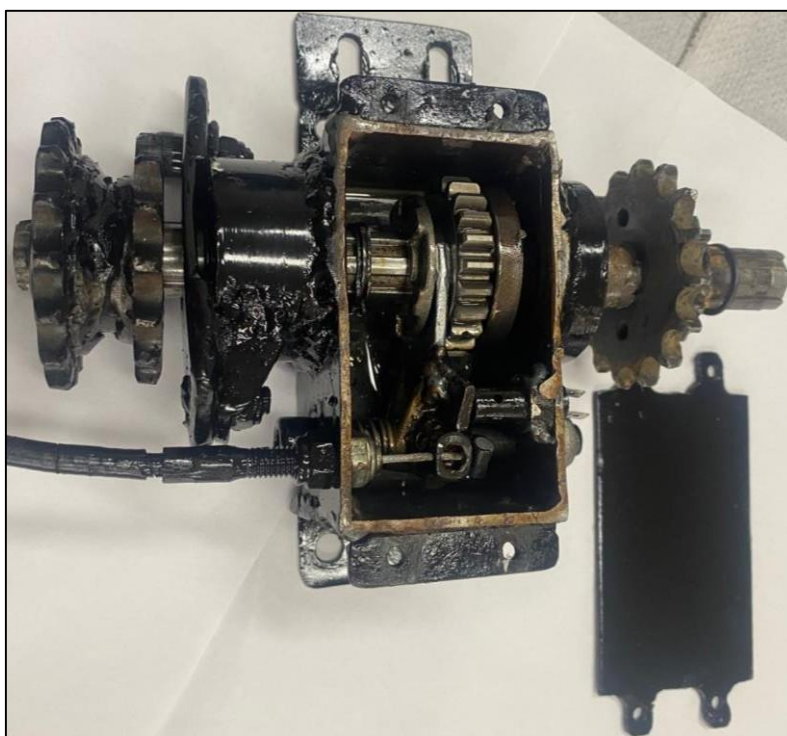
Com a caixa finalizada, seguiu-se para o processo de fabricação das engrenagens eixo e garfos, porém antes desta etapa, com base na metodologia usada sobre pesquisa de mercado, foi possível verificar que no mercado haviam eixos, engrenagens e garfos compatíveis com o projeto em questão, contendo as mesmas especificações técnicas aplicáveis, viabilizando a

aquisição direta das peças em vez de fabricá-las do zero. Com isto foi possível adquirir as peças necessárias, evitando gastos com mão de obra e usinagem, e se no futuro houver necessidade de reposição de algum item, terá no mercado a disposição, facilitando a troca.

Essa abordagem trouxe vantagens significativas, como a redução de custos com mão de obra e processos de usinagem, além da otimização do tempo de desenvolvimento. Além disso, a padronização das peças utilizadas no sistema garante uma configuração facilitada no futuro, uma vez que os componentes já estão disponíveis no mercado. Isso não apenas simplifica a manutenção, mas também garante a continuidade operacional do sistema sem a necessidade de produção personalizada, tornando o projeto mais sustentável e economicamente viável.

Com isto foi possível realizar a montagem completa do sistema (Figura 22), acompanhada de uma verificação minuciosa para garantir seu pleno funcionamento.

Figura 22- Caixa de acoplamento finalizada e montada.



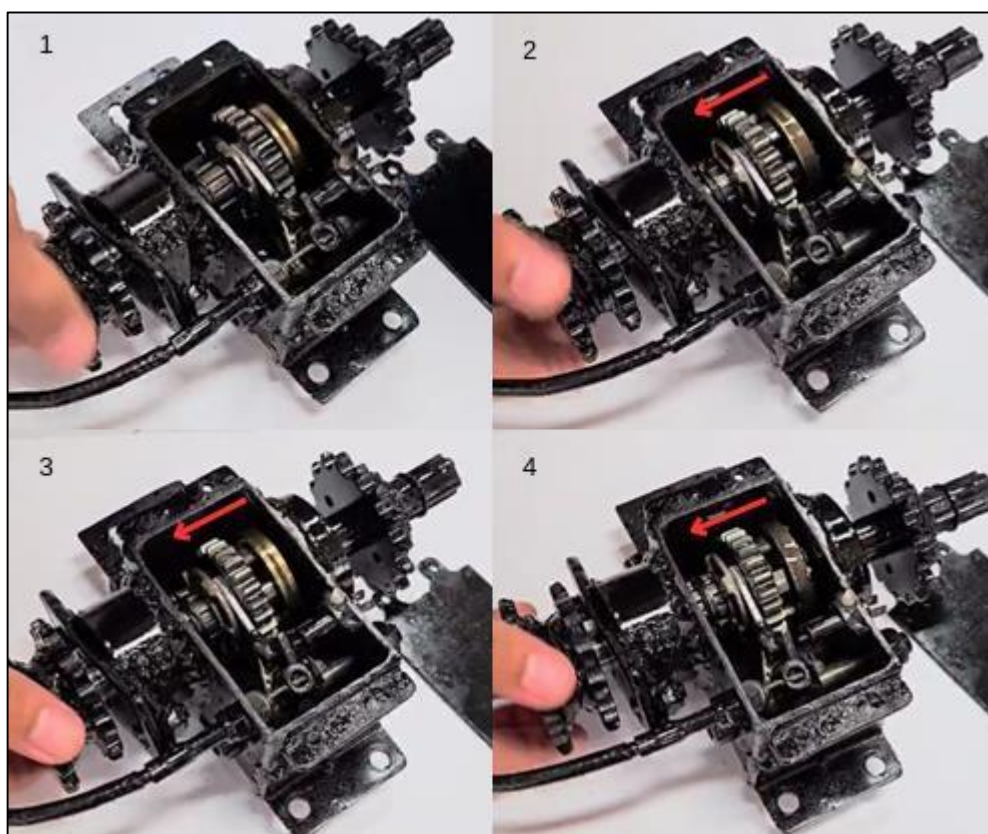
Fonte: Própria autoria.

4.4 Testes e validações

Os testes e validações foram necessárias para avaliar na prática a aplicação das soluções projetadas. Avaliando a eficácia de cada etapa do processo, garantindo a conformidade com normas, requisitos e cuidados técnicos essenciais para alcançar um projeto de alta qualidade.

Os testes iniciais foram prolongados antes da instalação do sistema de vedação no veículo, com o objetivo de verificar seu correto funcionamento de forma isolada. Para esta validação, foram utilizados frames de vídeo (Figura 23), permitindo uma análise detalhada do comportamento do sistema em operação. Essa abordagem possibilitou a identificação de ajustes possíveis e garantiu que todos os componentes que estivessem desempenhando suas funções conforme o esperado antes da integração final ao veículo.

Figura 23- Frame do funcionamento do acoplamento.



Fonte: Própria autoria.

- Ponto 1 – A engrenagem está totalmente acoplada, transmitindo torque entre os eixos. O sistema está na posição de engate total, permitindo a transmissão de potência.
- Ponto 2 – O piloto começa a acionar a alavanca de comando, tencionando o cabo. Esse movimento inicia o deslocamento da engrenagem deslizante, que começa a se separar do componente acoplado “engrenagem fixa”.
- Ponto 3 – A engrenagem já está quase desacoplada, restando pouco contato entre os dentes do engate.
- Ponto 4 – O desacoplamento está completo, e os eixos não estão mais conectados mecanicamente. Neste estágio, não há mais transmissão de torque entre os eixos.

Após a verificação do perfeito funcionamento do acoplamento entre as engrenagens, foi feita a instalação da caixa de acoplamento no veículo (Figura 24). Esse processo foi essencial para garantir a correta integração do sistema, garantindo alinhamento, fixação adequada e plena funcionalidade dos componentes. Assim permitindo validar o desempenho do conjunto sob condições reais de operação, garantindo que todas as interfaces mecânicas funcionassem de forma sincronizada e eficiente.

Figura 24- Caixa de acoplamento instalada no protótipo.



Fonte: Própria autoria.

Após a montagem do sistema, foram realizados testes de tração 4x4 no veículo, permitindo avaliar seu desempenho em condições reais de operação. Os primeiros testes foram realizados na UFERSA Caraúbas - RN, onde o sistema foi submetido a diversos tipos de terreno e apresentou resultados positivos, demonstrando eficiência e funcionalidade.

A validação mais relevante ocorreu durante as provas dinâmicas da competição BAJA SAE Nacional 2024 em São José dos Campos - SP onde o sistema de acoplamento foi rigorosamente testado sob critérios extremos e, aprovado em todas as provas.

A Figura 25 registra o teste de funcionalidade do sistema de transmissão 4x4 do veículo Caraubaja SAE. O procedimento consiste em posicionar a traseira do veículo sobre um cavalete (1), deixando as rodas traseiras suspensas e sem contato com o solo. Em seguida, o piloto aciona o sistema 4x4 (2), e o veículo deve se deslocar apenas com a rotação das rodas dianteiras (3).

Esse teste tem o objetivo de validar o funcionamento do sistema 4x4 e, consequentemente validando o sistema de acoplamento de eixos. Nas imagens, fica evidente

que o sistema foi validado com sucesso, pois o veículo consegue sair do cavalete apenas com a força das rodas dianteiras, confirmando que o mecanismo de acoplamento do sistema 4x4 está operando conforme projetado.

Além disso, na mesma temporada, o veículo competiu na etapa BAJA SAE Nordeste, realizado em Camaçari - BA, onde o sistema de acoplamento foi aprovado em todas as provas 4x4, isso não apenas demonstrou alto desempenho, mas também foi um fator determinante para garantir o maior lugar no pódio, consolidando a eficiência e a robustez do projeto.

Figura 25- Frame do teste de funcionalidade da transmissão 4x4, no Nacional 2024.



Fonte: Própria autoria.

4.5 Elaboração do FMEA

Com base na metodologia apresentada no tópico anterior, foram elaboradas as tabelas de FMEA, estruturando a análise dos modos de falha, seus efeitos e possíveis ações corretivas para garantir a confiabilidade do sistema.

Tabela 4- FMEA da engrenagem deslizante.

Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa Potencial	Gravidade (S)	Ocorrência (O)	Deteção (D)	NPR (S x O x D)	Ações Recomendadas
Desgaste excessivo dos dentes	Engate ineficiente, perda de torque	Lubrificação, sobrecarga	9	5	4	180	Verificar nível do óleo periodicamente e adicionar lubrificante se necessário
Deformação nos dentes	Engate brusco ou falha no fechamento	Sobrecarga momentânea, engate inadequado	8	4	5	160	Realizar engate em velocidade constante ou com o veículo parado
Desalinhamento	Aumento do atrito e desgaste	Erro na fabricação, falha no garfo de acionamento	7	3	6	126	Garantir tolerâncias dimensionais e alinhamento durante a montagem.

Fonte: Própria autoria.

Tabela 5- FMEA do garfo de acionamento.

Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa Potencial	Gravidade (S)	Ocorrência (O)	Deteção (D)	NPR (S x O x D)	Ações Recomendadas
Deformação do garfo	Impossibilidade de mover a engrenagem deslizante	Material inadequado, sobrecarga, material inadequado, falta de lubrificação	8	4	3	96	Usar materiais mais resistentes, realizar reforços estruturais, verificar eixo e lubrificação.
Desgaste nas superfícies de contato	Movimentação imprecisa ou falha no engate	Atrito excessivo, falta de lubrificação	7	5	4	140	Garantir lubrificação adequada e aplicar revestimentos resistentes.
Desalinhamento	Movimento limitado ou nenhum movimento, não engate	Erro de montagem, arranhões ou empeno no eixo do garfo	7	3	5	105	Realizar ajustes precisos no eixo e revisão das tolerâncias.

Fonte: Própria autoria.

Tabela 6- FMEA da engrenagem fixa.

Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa Potencial	Gravidade (S)	Ocorrência (O)	Deteção (D)	NPR (S x O x D)	Ações Recomendadas
Desgaste excessivo dos dentes	Transmissão de torque comprometida	Lubrificação insuficiente, carga excessiva	8	5	3	120	Melhorar as especificações de lubrificação e monitorar as cargas operacionais
Falha no engate	Perda de torque ou engate brusco	Dentes fora de alinhamento, eixos empenados, garfo de acionamento	9	3	5	135	Inspecionar precisão dimensional, lubrificação e deslocamento do garfo de acionamento
Quebra dos dentes	Falha total na transmissão de torque e barulho anormal	Sobrecarga, material com baixa resistência ou mal uso	10	2	4	80	Ajustar especificações do material para cargas maiores e usar de maneira adequada

Fonte: Própria autoria.

Tabela 7- FMEA da lubrificação.

Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa Potencial	Gravidade (S)	Ocorrência (O)	Deteção (D)	NPR (S x O x D)	Ações Recomendadas
Formação incompleta do filme	Desgaste rápido dos dentes	Lubrificante inadequado, condições extremas	9	4	5	180	Selecionar lubrificantes com alta adesividade e coesividade.
Contaminação do lubrificante	Aumento de atrito e falha em nos componentes	Falta de manutenção, entrada de partículas	8	4	4	128	Implementar filtro eficiente e cronograma de manutenção.
Vazamento de lubrificante	Redução da eficiência de lubrificação	Vedação incorreta, falha no design	7	3	4	84	Verifique o projeto das vedações e realize inspeções regulares.

Fonte: Própria autoria.

Com essas ações, espera-se um aumento significativo na confiabilidade e na vida útil do sistema de proteção, contribuindo diretamente para a eficiência operacional do veículo em condições extremas. O FMEA demonstrou ser uma ferramenta essencial para identificar riscos e priorizar melhorias, alinhando o design do sistema às demandas do ambiente competitivo de veículos *off-road*.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o sistema de acoplamento do tipo *dog clutch* mostrou altamente eficiente para aplicações de engate de eixos no âmbito *off-road*, proporcionando uma transição rápida e eficiente entre os modos de tração e, suportando com sucesso condições cíclicas severas e de altas cargas, sem comprometer o desempenho e a confiabilidade do sistema de transmissão.

A modelagem computacional permitiu a validação preliminar do sistema antes da fabricação, reduzindo falhas e otimizando o processo de produção. Durante a fase de manufatura, foram utilizadas as técnicas descritas na metodologia, garantindo precisão e qualidade no acoplamento dos componentes mecânicos. O processo de montagem foi conduzido de maneira criteriosa, assegurando a correta integração do sistema ao veículo.

Os testes iniciais, realizados na UFERSA Caraúbas-RN, foram bem-sucedidos e demonstraram o desempenho do sistema de acoplamento em condições reais de operação. Na competição BAJA SAE Nacional 2024 o sistema foi validado em todas as provas dinâmicas, reforçando sua confiabilidade e capacidade de desempenho. Posteriormente, na competição BAJA SAE Nordeste em Camaçari-BA o sistema novamente foi validado em todas as provas mostrando, confiança e eficiência do sistema, o que contribuiu diretamente para a conquista do primeiro lugar no pódio, consolidando o sucesso do projeto. Consolidando-se como uma referência no desenvolvimento de sistemas de tração 4x4 para competições Baja SAE.

Para projetos futuros, é relevante considerar algumas melhorias tanto no âmbito mecânico quanto no eletrônico. No contexto mecânico, recomenda-se o desenvolvimento de um sistema de acoplamento direto que não exija o desalinhamento entre os dentes das engrenagens, assim permitindo que o fechamento das engrenagens seja de forma imediata, o uso de anéis de sincronização podem ser uma solução. Além disso, é fundamental implementar soluções que possibilitem o desacoplamento rápido das engrenagens mesmo sob altas cargas de torque, eliminando o problema de fricção entre os dentes, que atualmente dificulta essa operação.

Também é possível substituir a alavanca de acoplamento manual, por um sistema eletrônico, buscando inovações e mecanismo automatizado, acionado por botão. Soluções como atuadores lineares ou servo motores podem oferecer maior precisão e conveniência, tornando o sistema mais eficiente e alinhado com as tendências de automação. Essas melhorias não apenas aumentaram a funcionalidade e a confiabilidade do sistema, mas também ampliaram seu potencial competitivo e tecnológico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COMO funciona a tração 4x4?. Direção de Cléber Willian Gomes. Produção de Mobilidade Estadão. Realização de Cléber Willian Gomes. 2022. (3 min.), son., color. Cléber é professor automobilístico da FEI, e fala a tração 4x4. Disponível em: <https://youtu.be/06v15xSTi3Q>. Acesso em: 17 mar. 2025.

SAE INTERNATIONAL. **Society of Automotive Engineers**. CDSBSRRevision_B. Disponível em: Acesso em: 28/09/2023.

CARQUEIJO, Luis Fernando R.. **Guia rápido de condução off-road**. 2008. Manual do Utilizador 4x4 de Antônio Mendes Nunes Revista 4x4&Cia. Disponível em: <http://www.trailway.com.br/>. Acesso em: 07 out. 2023.

BARROS, Genario Lopes Pereira. Estudo da ação e do funcionamento da CTV (Transmissão Continuamente Variável). 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade Pitágoras, São Luís, MA, 2018.

NAUNHEIMER, H. et al. **Automotive Transmissions**. 2ª edição. New York: Springer, 2011.

GAIOTTO, 2000. Gaiotto, João Roberto de Camargo. **Técnica 4x4: guia de condução fora de estrada**. Técnica 4x4, 2000.

Regulamento Baja Sae Brasil (Ratbsb) – Emenda. **REGULAMENTO ADMINISTRATIVO E TÉCNICO BAJA SAE BRASIL**. 2019. Disponível em: http://saebrasil.org.br/wp-content/uploads/2020/03/RATBSB_emenda_03.pdf. Acesso em: 01 out. 2023.

GILL, B. A. S.; SEHDEV, M.; SINGH, H. Four-Wheel Drive System: Architecture, Basic Vehicle Dynamics and Traction. Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, GD Goenka University, India. In International Journal of Current Engineering and Technology, (p. 361-366), 2018.

RAJAMANI, R. Dinâmica e controle de veículos . 2ª ed. Nova York: Springer, 2012.

NICOLAZZI, L. Dinâmica veicular. Curso de especialização em engenharia automotiva UFSC 2004.

DIEGO, D. **Estudo da dinâmica vertical em suspensão duplo a de um veículo off-road tipo baja**. 2014. 134f. Dissertação (de Mestrado), apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

ALMEIDA, Rafael; ARAUJO, Gabriel; OLIVEIRA, Tiago. **Estudo de Viabilidade de uma Transmissão 4x4 AWD em um Veículo Baja Sae Fundamentado Na Dinâmica Veicular**. 2022. 116f. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2022.

ESTUDO DE PROPOSTAS PARA UM SISTEMA DE TRAÇÃO 4X4 EM UM VEÍCULO DO TIPO BAJA SAE. Lajeado: Destaque Acadêmicos, v. 12, 01 dez. 2020. Mensal.

NORTON, Robert L. Machine design: an integrated approach. 4. ed. Boston: Prentice Hall, 2011.

KURILOV, Willian; ZABEU, Clayton. **ensaios em moteres de combustão interna Correlação motores Briggs S19 e S20 e Honda GX390**. Mauá: Instituto Mauá de Tecnologia, 2024. 32 slides, color. Apresentado no briefing da etapa Nacional BAJA SAE Brasil 2024.

MANAVELLA, Humberto José. **Transmissão Automática - CVT**. Hmautotron. engenharia. Disponível em: <http://www.hmautotron.eng.br/zip/hm006-c12-CVT.pdf>. Acesso em: 03 out. 2023.

CROLLA, D. A. Automotive engineering: powertrain, chasis system and vehicle body. Oxford: Elsevier, 2009.

PROCEL INDÚSTRIA (Rio de Janeiro). Confederação Nacional da Indústria. Acoplamento motor carga. Rio de Janeiro, 2009. 145.

SHIGLEY, JOSEPH E., MISCHKE, CHARLES R. e BUDYNAS, RICHARD G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. [trad.] João Batista de Aguiar e José Manoel de Aguiar. 7ª edição. São Paulo : Bookman, 2006.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas**: Uma Abordagem Integrada. 4ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

MELCONIAN, Sarkis. Elementos de máquinas. 9ª ed. Revisada, 2009.

GERDAU. **Manual de Aços**. [S.l.]: [s.n.], 2003.

E. R. Booser, “Design Principles: Gears,” em CRC Handbook of Lubrification (Theory and Practice of Tribology), New York, CRC Press, 1983, pp. 539-564.

FMEA: Como aplicar, Vantagens e Analises. Disponível em <<https://www.fm2s.com.br/blog/fmea>>. Acesso em: 10 de jan. de 2025.