

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL  
Campus Ibirubá**

**GUILHERME MALDANER ZANCHIN**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO PARA  
VEÍCULO BAJA SAE**

**Ibirubá**

**2022**

GUILHERME MALDANER ZANCHIN

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO PARA VEÍCULO  
BAJA SAE

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado como requisito para conclusão do  
curso Superior em Engenharia Mecânica do  
Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia, Campus Ibirubá.

Orientador: M.Sc. Giancarlo Stefani Schleder

Ibirubá

2022

*Desenvolvimento de um sistema de transmissão para veículo Baja SAE*

**Guilherme Maldaner Zanchin**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Ibirubá, 25 de fevereiro de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. (orientador) M.Sc. Giancarlo Stefani Schleder  
IFRS campus Ibirubá

Prof. Dr. Cristiano Kulman  
IFRS campus Ibirubá

Prof. M.Sc. Jefferson Moraes Gautério  
IFRS campus Ibirubá

*Carry on, it's time to forget*

*The remains from the past to carry on*

*Carry on, Angra*

## RESUMO

O presente trabalho trata do projeto de uma caixa de transmissão para um veículo de competição Baja SAE através de um Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos – PRODIP. Este desenvolvimento tem como objetivo o projeto para o carro da equipe Ibirubaja do IFRS – Campus Ibirubá, onde através da metodologia coletou-se os requisitos de usuário da equipe e buscou-se uma concepção de produto onde estes requisitos fossem cumpridos. Através de ferramentas constatou-se que a melhor concepção é a utilização de câmbio CVT juntamente de uma caixa de redução de um trem de engrenagens de dentes retos para atender ao torque máximo necessário. A caixa de redução foi dimensionada para suportar os esforços resultante da aplicação de torque. Por fim, projetou-se em CAD (*Computer Aided Design*) o modelo de caixa de redução e avaliou-se a possibilidade de construção da mesma.

**Palavras chave:** Sistema de Transmissão; Caixa de Redução; Metodologia de Projeto; Baja SAE.

## **ABSTRACT**

The presente work deals with the design of a transmission box for a Baja SAE competition vehicle through an Integrated Product Development Process – PRODIP. This development has as objective the project for the car of Ibirubaja team from IFRS – Campus Ibirubá, Where, through the methodology, the user requirements of the team were collected and a product conception was sought where these requirements were met. Through tools it was found that the best design is the use of CVT transmission together with a reduction box of a gear train with spur gears to meet the maximum torque required. The reduction box was dimensioned to withstand the efforts resulting from the application of torque. Finally, the reduction box model was built in CAD (Computer Aided Design) and the possibility of its construction was evaluated.

**Key words:** Powertrain; Reduction Box; Project Methodology; Baja SAE.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de transformação.....	11
Figura 2 - Casa da Qualidade.....	12
Figura 3 - Campo IV da Casa da Qualidade .....	15
Figura 4 - Função global do produto .....	17
Figura 5 - Matriz morfológica .....	19
Figura 6 - Quadro de valoração dos critérios.....	20
Figura 7 - Esquema de câmbio manual.....	22
Figura 8 - Sistema de engrenagem planetária.....	24
Figura 9 - Conversor de torque .....	25
Figura 10 - CVT toroidal .....	26
Figura 11 - Câmbio CVT.....	27
Figura 12 - Esquema de embreagem.....	28
Figura 13 - Par de engrenagens de dentes retos.....	29
Figura 14 - Engrenagens helicoidais.....	29
Figura 15 - Engrenagens cônicas .....	30
Figura 16 - Engrenagens hipoidais .....	30
Figura 17 - Ilustração do ângulo de pressão .....	31
Figura 18 - Formatos de correias .....	32
Figura 19 - Corrente de rolos.....	32
Figura 20 - Representação das distâncias apresentadas na Equação 6 .....	34
Figura 21 - Forças atuantes.....	37
Figura 22 - Fator geométrico de resistência a flexão.....	40
Figura 23 - Motor do Baja .....	41
Figura 24 - Curva de torque .....	41
Figura 25 - Síntese do equipamento .....	43
Figura 26 - Casa da Qualidade.....	46
Figura 27 – Função global da caixa de transmissão .....	49
Figura 28 - Desdobramento das subfunções .....	49
Figura 29 - Matriz morfológica do sistema de transmissão.....	50
Figura 30 - Legenda das concepções .....	51

Figura 31 - Análise das concepções.....	52
Figura 32 - Força e torque máximo .....	54
Figura 33 - Cálculo da relação de transmissão .....	54
Figura 34 - Esboço da caixa de redução .....	55
Figura 35 - Dimensionamento das engrenagens .....	56
Figura 36 - Fatores de correção .....	56
Figura 37 - Cálculos da tensão AGMA .....	57
Figura 38 - Caixa de redução .....	59
Figura 39 - Disposição das engrenagens .....	60
Figura 40 – Montagem no eixo.....	61
Figura 41 - Alavanca de seleção de marchas .....	61
Figura 42 - Principais dimensões da carcaça .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Redação dos requisitos de projeto .....	17
Tabela 2 - Parâmetros geométricos da engrenagem .....	36
Tabela 3 - Fator de sobrecarga.....	39
Tabela 4 - Fator de distribuição de carga.....	39
Tabela 5 - Redação dos requisitos de caixa de transmissão .....	47
Tabela 6 - Atributos do projeto.....	48
Tabela 7 - Avaliação de atributos .....	52
Tabela 8 - Esforços calculados .....	58
Tabela 9 - Engrenagens selecionadas .....	58

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>6</b>
1.1	OBJETIVOS .....	6
1.1.1	Objetivo Geral .....	6
1.1.2	Objetivos Específicos .....	6
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>8</b>
2.1	BAJA SAE .....	8
2.2	METODOLOGIA DE PROJETO .....	8
2.2.1	Planejamento do Projeto .....	9
2.2.2	Projeto Informacional.....	10
2.2.3	Projeto Conceitual.....	17
2.2.4	Projeto Preliminar .....	20
2.2.5	Projeto Detalhado.....	21
2.3	ELEMENTOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO .....	21
2.3.1	Câmbios.....	22
2.3.2	Embreagem.....	27
2.3.3	Elementos de Transmissão .....	28
2.3.4	Lubrificação.....	33
2.3.5	Dimensionamento da relação de transmissão.....	34
2.3.6	Dimensionamento de engrenagens de dentes retos .....	35
2.4	MOTOR DO VEÍCULO .....	40
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>42</b>
3.1	PLANEJAMENTO DO PROJETO .....	42
3.2	PROJETO INFORMACIONAL .....	43
3.3	PROJETO CONCEITUAL .....	48
3.4	PROJETO PRELIMINAR .....	52
3.4.1	Cálculo da relação de transmissão.....	53
3.4.2	Dimensionamento das engrenagens.....	55
3.4.3	Montagem em CAD da caixa de redução.....	58

<b>3.4.4 Custos .....</b>	<b>62</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A caixa de transmissão dos veículos é um dos componentes responsáveis para a transmissão de força do motor até as rodas para que o carro se mova. Esta faz o controle de força e velocidade através das marchas, sendo de extrema importância para que o automóvel seja eficiente.

Nas competições Baja SAE, as equipes podem trabalhar livremente em diferentes modelos de transmissão para seus protótipos. Visto que o motor utilizado é padrão para todas as equipes, o desempenho deve ser trabalhado em outros componentes buscando se sobressair nas provas.

Assim, o presente trabalho foi realizado para projetar uma caixa de transmissão para o veículo Baja SAE da equipe Ibirubaja do IFRS – Campus Ibirubá, visando alguns requisitos como torque adequado, velocidade máxima.

Para o projeto, serão utilizadas metodologias de projeto de produto, especialmente os métodos de Back et al. (2008) e Pahl et al. (2005), aprofundando-se em fases como projeto informacional e projeto conceitual, assim serão seguidos passos para a escolha da concepção que será projetada, estudando requisitos de projeto para direcionar a melhor opção para o protótipo da equipe Ibirubaja. Também será utilizado *software CAD (Computer Aided Design)* para a modelagem.

### 1.1 OBJETIVOS

#### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de transmissão para um veículo de competição *off-road* BAJA SAE utilizando uma metodologia de projeto.

#### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar uma metodologia de projeto para estabelecer a concepção do produto.
- Buscar através da equipe e das normas da competição os requisitos necessários para o sistema de transmissão.
- Dimensionar através de cálculos os elementos do sistema de transmissão.

- Modelar através de *software* CAD a concepção selecionada através da metodologia.
- Avaliar qualitativamente como os requisitos de projeto foram atendidos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A pesquisa se dará através de dois grandes tópicos, o primeiro referente a metodologia de projeto e o segundo aos componentes de transmissão que poderão ser incorporados na caixa de transmissão ao final do projeto. Também será apresentado a competição BAJA SAE e o motor padrão da competição.

### 2.1 BAJA SAE

A competição Baja SAE é organizada pela SAE Brasil, entidade que foi iniciada em 1991. Sua missão é “Disseminar a tecnologia e o progresso da mobilidade” (BRASIL). Assim, a busca por conhecimento na questão de mobilidade levou a promoção de eventos, como é a competição Baja SAE.

O Programa Baja SAE, conforme o Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil (RATBSB) – Emenda 1, desafia os estudantes a realizarem um projeto através de um processo integrado, aplicando conhecimentos adquiridos academicamente.

A competição é realizada entre equipes formadas em uma instituição de ensino superior. Possui-se etapas regionais, nacionais, além da etapa internacional, reunindo instituições de ensino do mundo todo.

Nesta competição existem diferentes provas, desde prova de segurança até eventos dinâmicos e enduro. Assim, o carro necessita combinar aceleração e velocidade nas provas dinâmicas, onde percorre-se uma pista plana de 100m, para obter pontuações altas. Já o enduro de resistência o veículo é colocado para dar voltas em uma pista com obstáculos, e enfrenta situações semelhantes a ralis. A prova tem duração de 4 horas, assim o carro necessita ser robusto.

Ressalta-se que o regulamento não traz especificações para o sistema de transmissão, podendo a equipe trabalhar livremente em concepções diferentes. Este ponto diferencia as equipes, já que o motor é padronizado e não pode ser modificado.

### 2.2 METODOLOGIA DE PROJETO

A metodologia de projeto consiste em uma série de tarefas que possuem uma sequência lógica para o desenvolvimento do projeto. Assim, parte-se de diversas características

qualitativas, onde posteriormente estas são transformadas em requisitos de projeto, ou seja, são quantitativas. Para Pahl et al. (2005) o desenvolvimento necessita o planejamento do processo, o estabelecimento de um cronograma de atividades e o planejamento dos custos do produto.

Existem diversos modelos de desenvolvimento de projeto, trazidos por diferentes autores. Ulrich e Eppinger (2004) divide o processo em fases para desenvolvimento, concepção, projeto e comercialização de um produto. No modelo de Pahl et al. (2005) a fase inicial consiste em planejar e esclarecer a tarefa, para posteriormente conceber, projetar e detalhar o produto. Por fim, Back et al (2008) apresenta um modelo de Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos – PRODIP. Este contribui para que se possa executar um processo de desenvolvimento formal e sistemático, integrado aos demais processos empresariais. O processo é desdobrado em macro fases, atividades e tarefas.

As etapas, também denominadas como fases, listadas conforme a metodologia de Back et al. (2008).

- Fase 1 – Planejamento do Projeto;
- Fase 2 – Projeto Informacional;
- Fase 3 – Projeto Conceitual;
- Fase 4 – Projeto Preliminar;
- Fase 5 – Projeto Detalhado.

### **2.2.1 Planejamento do Projeto**

Na fase de planejamento do projeto busca-se planejar o desenvolvimento do produto. Assim, conforme Back et al. (2008), itens gerais são definidos, como o escopo do projeto, orçamento e cronograma, onde ao final do planejamento tem-se o plano de projeto.

Portanto, o primeiro passo é identificar e estabelecer o conteúdo do projeto, sendo este o escopo dele. Logo, segundo Carpes Jr. (2014), o escopo do projeto especifica os assuntos que serão tratados. Além disso, a definição de objetivos de projeto e restrições se mostram viáveis a fim de nortear e simplificar a realização do planejamento.

Segundo Carpes Jr. (2014) os objetivos são geralmente divididos em gerais e específicos. O objetivo geral identifica o produto que se deseja desenvolver, o qual aponta para o resultado desejado, que retrata o estado final do projeto.

Os objetivos específicos identificam as definições de prazos, qualidades e custos. Eles abrangem tanto o planejamento dos investimentos quanto o dos retornos esperados. Como são utilizados para identificar os alvos e verificar o sucesso do projeto, e neste caso o sucesso do presente trabalho, devem ser claramente definidos e mensuráveis, de maneira que se possa quantificá-los.

Ainda pode-se estabelecer restrições quanto ao projeto, podendo ser em qualquer área, por exemplo no preço final do produto, o qual não pode ultrapassar um valor estipulado. Conforme Carpes Jr. (2014), as restrições são limitações que devem ser superadas ou contornadas e podem ter naturezas diversas como ambiental, tecnológica, econômica, entre outras.

Posteriormente as definições básicas do projeto, determina-se os recursos financeiros. A estimativa realizada é designada pelo capital necessário, que engloba todas as obrigações financeiras ligadas direta ou indiretamente ao projeto do produto.

Assim, a fase de planejamento conclui-se, possuindo-se informações básicas sobre o escopo as quais serão detalhadas nas fases seguintes.

### **2.2.2 Projeto Informacional**

A segunda fase é o projeto informacional. Nesta etapa, conforme Carpes Jr. (2014) inclui-se o estudo dos requisitos do consumidor, a descrição da ideia do produto, a elaboração da lista de requisitos e a transformação dos requisitos em especificações, obtendo-se as características de engenharia do produto.

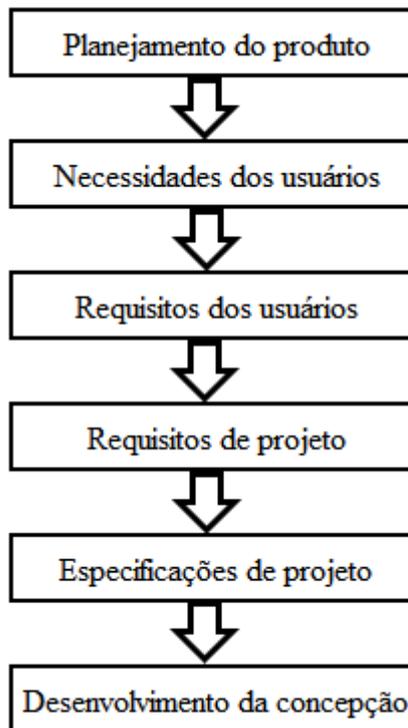
Para Back et al. (2008), as necessidades do consumidor são itens fundamentais para o planejamento, e são também o ponto crítico deste, visto que trata da demanda do usuário, a qual deve ser atendida para que o produto seja satisfatório.

Após a definição das necessidades de usuário transforma-se estas em requisitos de usuário, onde pode-se agrupar, resumir ou classificar em uma linguagem mais apropriada para a engenharia.

Posteriormente, estabelece-se as especificações do projeto. Estas, conforme Back et al. (2008), são o principal resultado do projeto informacional pois propiciam o entendimento e descrição do problema. Portanto, as especificações serão utilizadas como base dos critérios de avaliação e de tomadas de decisão nas etapas seguintes. Além disso, os requisitos do projeto do produto devem ser passíveis de mensuração, ou seja, são quantitativos.

A Figura 1 mostra um fluxograma dos passos para a transformação das necessidades do usuário em especificações de projeto.

Figura 1 - Fluxograma de transformação



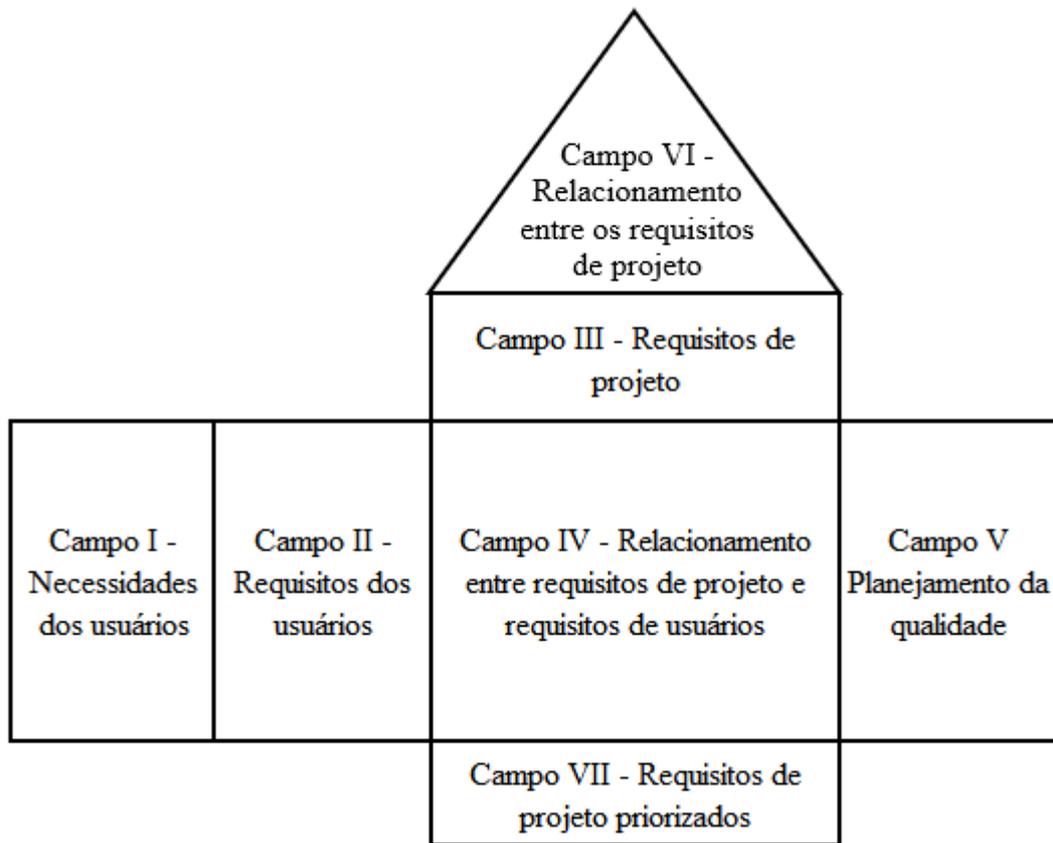
Adaptado de: Back et al. (2008)

Portanto, a partir das especificações do projeto, é possível montar possíveis concepções de produtos e verificar quais destas estão de acordo com os itens especificados anteriormente a fim de atender os requisitos, garantindo um melhor resultado.

#### 2.2.2.1 Casa da Qualidade

Para a transformação dos requisitos será utilizado a “Casa da Qualidade” (Figura 2), a qual relaciona alguns fatores como os requisitos de usuário e de projeto para estabelecer as especificações do projeto. Além disso, sua função principal é hierarquizar os requisitos de projeto.

Figura 2 - Casa da Qualidade



Adaptado de: Back et al. (2008)

Para chegar nas necessidades de usuários pode-se fazer entrevistas diretamente com consumidores do produto. Além disso, uma estratégia bastante utilizada é a pesquisa de mercado, realizando um *benchmarking* em empresas concorrentes, buscando ideias para implementação no produto próprio. “Essa análise identifica os melhores na classe e ideias inovadoras.” (BACK et al., 2008). Estas informações ficam dispostas no Campo I da casa da qualidade, mostrada na Figura 2.

Findado a aquisição de dados referente aos usuários e ao mercado, “é conveniente que as necessidades sejam desdobradas ou agrupadas nos requisitos de usuário” (BACK et al., 2008). As necessidades após elencadas em itens comuns é disposta no Campo II.

No Campo V encontra-se o planejamento da qualidade, ou seja, é onde analisa-se o produto e os concorrentes atribuindo pesos conforme os requisitos de usuário. Logo, “o objetivo dessa análise é a determinação dos fatores de importância e as metas dos requisitos dos usuários.” (BACK et al., 2008)

O Quadro 1 mostra os itens a serem preenchidos no planejamento da qualidade.

Quadro 1 - Campo V da Casa da Qualidade

	<i>gi</i>	A	B	C	<i>Vm</i>	<i>tm</i>	<i>fv</i>	<i>pa</i>	<i>pru</i>
Requisito 1									
Requisito 2									

Adaptade de: Back et al. (2020)

- Grau de importância (*gi*): valor que varia de 1 a 5 e pode ser atribuído tanto pelo usuário durante a pesquisa de mercado como pela equipe. Demonstra qual a importância do requisito para o usuário.
- Análise de concorrentes (A, B, C): atribuído pelos usuários, comparando o produto de empresas concorrentes com a empresa própria, sendo designada como “Empresa A” no Quadro 1. É numerado de 1 a 5.
- Valor meta (*Vm*): também chamado de plano de qualidade. Representa o quão longe pretende-se chegar para satisfazer o requisito do usuário. É estabelecido pela equipe de projeto, e assim como os anteriores, são mensurados de 1 a 5.
- Taxa de melhoramento (*tm*): obtido pela Equação (1) e representa “o quanto o produto da empresa poderá ser melhorado com relação a determinado requisito.” (BACK et al., 2008)

$$tm = \frac{Vm}{A} \quad (1)$$

Onde:

*tm*: Taxa de melhoramento

*Vm*: Valor meta

*A*: Nota dada ao produto existente da empresa

- Fatores de venda (*fv*): constitui na estratégia de venda da empresa, ou seja, o quão explorado será o requisito na propaganda feito para o mercado. É dividido em três possibilidades, sendo elas 1,5; 1,2 e 1,0, onde o maior número corresponde a uma estratégia mais agressiva.

- Peso absoluto ( $pa$ ): obtido conforme Equação (2), onde ( $gi$ ) é o grau de importância, ( $tm$ ) é a taxa de melhoramento e ( $fv$ ) o fator de venda.

$$pa = gi \cdot tm \cdot fv \quad (2)$$

Sendo:

$pa$ : Peso absoluto

$gi$ : Grau de importância

$tm$ : Taxa de melhoramento

$fv$ : Fator de venda

- Peso do requisito do usuário ( $pru$ ): é o peso absoluto relativo, dado pelo peso absoluto do requisito dividido pelo somatório dos pesos absolutos como mostra a Equação (3).

$$pru = \frac{pa}{\sum_0^n pa} \quad (3)$$

Onde:

$pru$ : Peso do requisito do usuário

$pa$ : Peso absoluto

Segundo Back et al. (2008), a valoração dos requisitos dos usuários é uma atividade básica para o restante da casa da qualidade, por isso deve-se garantir que os resultados não sejam duvidosos, pois, afetam diretamente os outros campos dos quais serão utilizados para a criação das possíveis concepções do produto.

Após a conclusão do Campo V da casa da qualidade, o próximo passo é converter os requisitos de usuário em características de engenharia. Conforme Back et al. (2008), os atributos de engenharia do projeto expressam o resultado em linguagem técnica. Os requisitos referem-se a parâmetros, grandezas físicas, funções e restrições do produto. Além disso, o autor entende as características atribuídas pelos usuários como os problemas de projeto a serem resolvidos.

Assim, define-se os parâmetros de projeto, que devem ser mensuráveis e nortearão a escolha de concepções nas fases seguintes. Juntamente com o requisito utiliza-se um sinal de

medição, mais (+) para o aumento e menos (-) para a diminuição do requisito. Estas informações ficam dispostas no Campo III da casa da qualidade.

A próxima etapa é o preenchimento da parte central da casa da qualidade, onde relaciona-se os requisitos de usuário com os requisitos de engenharia. Para Back et al. (2008), o relacionamento entre os requisitos pode ser forte, médio, fraco ou nulo e mensura-se conforme a representatividade do requisito de projeto referente ao requisito de usuário. Outros autores trazem propostas semelhantes, como Forcellini (2002), que utiliza símbolos para a representação dos valores de relacionamento entre os requisitos.

A Figura 3 mostra o Campo IV de uma casa da qualidade. Também se nota os pesos de cada relacionamento, onde o nulo pode ser atribuído com 0 ou simplesmente deixado em branco.

Figura 3 - Campo IV da Casa da Qualidade

Grau de relacionamento entre Requisitos de Usuários e Requisitos de Projeto		Requisito de Eng	Requisito de Eng	Requisito de Eng	Requisito de Eng
		+	+	+	+
Requisito de usuário 1	1	5	5	1	
Requisito de usuário 2	2	1	3		3
Requisito de usuário 3	3	3	5		

Adaptado de: Back et al. (2008)

Aqui será estabelecido a ordem de prioridades de requisitos. Para isso, calcula-se o peso de importância ( $pi$ ), o qual representa o somatório da multiplicação do valor atribuído entre a relação de requisitos ( $rr$ ) pelo peso de requisito do usuário ( $pru$ ) conforme mostra a Equação (4).

$$pi = \sum rr \cdot pru \quad (4)$$

Sabendo que:

$pi$ : Peso de importância  
 $rr$ : Relação de requisitos  
 $pru$ : Peso de requisito do usuário

Além do peso de importância, calcula-se a importância relativa ( $pir$ ), dividindo o peso do requisito pelo seu somatório como mostra a Equação (5), facilitando a análise deles.

$$pir = \frac{pi}{\sum pi} \quad (5)$$

Sendo:

$pir$ : Peso de importância relativa  
 $pi$ : Peso de importância

O próximo passo é o preenchimento do Campo VI, o “telhado”. Neste espaço relacionam-se as características de engenharia com os parâmetros nela estabelecidos. Essa relação determina o quanto a alteração de um atributo influencia outro. Existem três possibilidades para a relação, conforme a metodologia de Back et al. (2008):

- V – A relação entre os requisitos é positiva.
- X – A relação entre os requisitos é negativa
- Em branco – Os requisitos não possuem relação entre si

Assim, cada relação da escala mostra que a alteração feita em um requisito pode influenciar positiva ou negativamente em outro, enquanto em outros o efeito é nulo.

Para finalizar a casa da qualidade, é ainda necessário a ordenação dos requisitos de projeto conforme o peso de importância relativo, sendo este o resultado efetivo desta etapa de projeto.

#### 2.2.2.2 Redação dos requisitos de projeto

Findado o preenchimento da casa da qualidade, o seu resultado é estruturado em forma de tabela, também conhecido como a redação dos requisitos de projeto. Com os cálculos

realizados, ordena-se os requisitos do maior para o menor, sendo este o grau de importância, além de conter os valores determinados para cada requisito. A Tabela 1 mostra um exemplo de redação para um produto qualquer.

Tabela 1 - Redação dos requisitos de projeto

Especificação	Valor	Unidade de medida	Grau de importância
Calabresa	270	g	1º
Preço	15	\$	2º
Diâmetro	35	cm	3º
Queijo	180	g	4º

Adaptado de: Carpes Jr. (2014)

Pode-se adicionar duas colunas referentes ao modo de verificação do atendimento ao valor do requisito e os possíveis riscos do não atendimento destes. Assim finaliza-se a etapa de projeto informacional, obtendo-se os critérios que delimitam o desenvolvimento do produto.

### 2.2.3 Projeto Conceitual

Esta é a fase 3 do projeto, onde conforme Carpes Jr. (2014) é gerado os princípios de solução viáveis para o produto, e após a avaliação conforme os requisitos técnicos definidos anteriormente escolhe-se os princípios de solução que atendem aos mesmos.

Figura 4 - Função global do produto



Fonte: Schleder adaptado de Pahl et al. (2005)

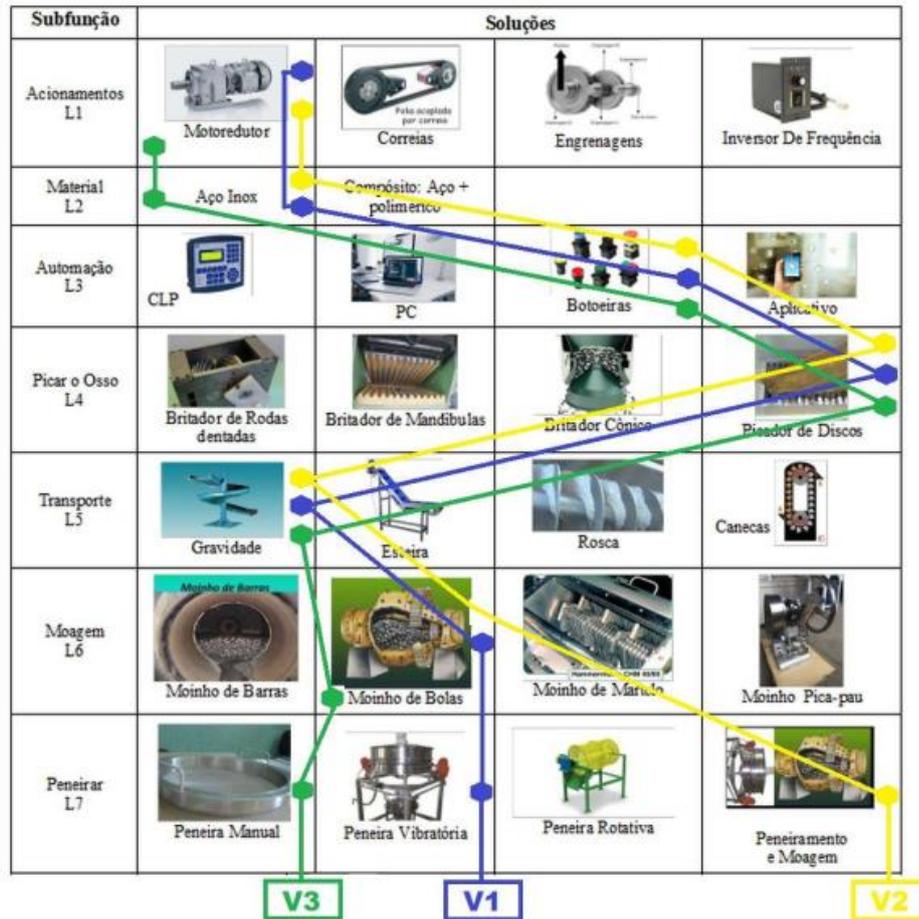
Back et al. (2008) traz como ponto de partida a formulação do problema, os quais são as especificações de projeto. Para elencar uma resolução busca-se informações de diversas maneiras, como o *benchmarking*, por exemplo. A fim de criar concepções que possam resolver o problema, utiliza-se métodos sistemáticos definindo a função global do produto. Existem diferentes ferramentas para esta etapa, onde Pahl et al. (2005) apresenta um formato de fluxograma, como exemplificado pela Figura 4, para o estabelecimento da função global do produto e suas respectivas subfunções.

### 2.2.3.1 Matriz morfológica

“O método da matriz morfológica consiste em uma pesquisa sistemática de diferentes combinações de elementos ou parâmetros, com o objetivo de encontrar uma nova solução para o problema.” (BACK et al., 2008)

A Figura 5 mostra um exemplo de matriz morfológica para um picador de osso.

Figura 5 - Matriz morfológica



Fonte: Schleder (2021)

Para a construção da matriz morfológica, Back et al. (2008) sugere seguir 6 passos, os quais serão listados abaixo:

- 1º passo: necessita-se identificar as funções e parâmetros do processo a ser realizado pelo produto.
- 2º passo: preenche-se a primeira coluna da matriz com as funções identificadas no 1º passo.
- 3º passo: procurar alternativas de princípios de solução para cada parâmetro listado.
- 4º passo: cria-se concepções alternativas para solucionar o problema global combinando os princípios de solução resultando em um produto.
- 5º passo: nesta etapa ocorre a avaliação e seleção das concepções.
- 6º passo: estabelecimento do leiaute e descrição da concepção.

### 2.2.3.2 Avaliação e seleção da concepção

Para a seleção da concepção, Back et al. (2008) recomenda a utilização de uma metodologia para que seja escolhida a melhor ou mais adequada ideia. O método consiste no estabelecimento de critérios quantitativos, os quais serão valorados conforme cada concepção escolhida.

A comparação se dá através do quadro comparativo da análise de sensibilidade (Figura 6) e demonstra o efeito de variações nos valores atribuídos, além de quantificar e assim possibilitar a ordenação das concepções escolhidas.

Figura 6 - Quadro de valoração dos critérios

Critérios de seleção	Pesos dos critérios	Concepções geradas											
		Concepção AB			Concepção LM			Concepção REF			Concepção XY		
		$A_{i,1}$	$u_{i,2}$	$w_i * u_{i,1}$	$A_{i,2}$	$u_{i,2}$	$w_i * u_{i,2}$	$A_{i,3}$	$u_{i,3}$	$w_i * u_{i,3}$	$A_{i,4}$	$u_{i,4}$	$w_i * u_{i,4}$
X1	$w_1$												
X2	$w_2$												
X3	$w_3$												
X4	$w_4$												
X5	$w_5$												
X6	$w_6$												
...	...												
...	...												
Valor da função utilidade		$\sum_{i=1}^n w_i * u_{i,1}$			$\sum_{i=1}^n w_i * u_{i,2}$			$\sum_{i=1}^n w_i * u_{i,3}$			$\sum_{i=1}^n w_i * u_{i,4}$		
Ordenação das concepções		3ª Posição			1ª Posição			4ª Posição			2ª Posição		

Adaptado de: Back et al. (2008)

O peso dos critérios ( $w$ ) é determinado pela equipe do projeto, os quais utilizam sua experiência, conhecimentos e preferências para realizar a valoração. O quanto a concepção atende ao requisito é representado por  $u$ .

### 2.2.4 Projeto Preliminar

Findado o projeto conceitual com a escolha da melhor concepção do produto, inicia-se a fase de projeto preliminar. Assim, o modelo começa a tomar forma através de *software* de Desenho Assistido por Computador (CAD – *Computer Aided Design*).

Carpes Jr. (2014) afirma que a configuração do produto é determinada neste momento, onde se busca atender as especificações de projeto, além de uma configuração que permita a produção e funcionamento, desenvolvendo um equipamento simples e claro em sua essência.

Para o início da criação, Carpes Jr. (2014) recomenda efetuar um esboço dos componentes do produto listando-os e indicando os materiais e processos de fabricação que serão utilizados. Para isso, é preciso considerar os recursos disponíveis para produção e garantir que os requisitos de engenharia sejam atendidos. Além disso, os materiais devem ser compatíveis com os processos de produção caso estes sejam restritos. Após a modelagem dos componentes e do produto, é recomendado a criação de uma tabela onde encontram-se as informações de quantidade de componentes, quais são, além do material e processo de fabricação.

A última etapa do projeto preliminar é a otimização. Conforme Carpes Jr. (2014), é onde se corrige possíveis problemas do produto através de experimentação, desenvolvendo aspectos específicos do produto, ou formulações matemáticas, onde as fórmulas e equações representam o fenômeno que ocorre no produto, abrangendo cálculos de resistência dos materiais, elementos de máquinas, transferência de calor. Assim, evita-se o subdimensionamento dos equipamentos.

### **2.2.5 Projeto Detalhado**

O projeto detalhado é a última fase da metodologia de projeto do produto, o qual possui a função de gerar a documentação necessária para a produção do equipamento. Carpes Jr. (2014) diz que são necessárias as informações referentes a configuração do produto, como desenhos técnicos, materiais, máquinas e ferramentas para fabricação e procedimentos de montagem. O autor ressalta também que se deve detalhar os itens citados conforme a realidade comercial.

## **2.3 ELEMENTOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO**

O sistema de transmissão contém diferentes elementos, a depender principalmente do sistema ser automático ou manual, onde pode-se possuir um conversor de torque ou uma embreagem, por exemplo. Assim, alguns destes serão apresentados a seguir:

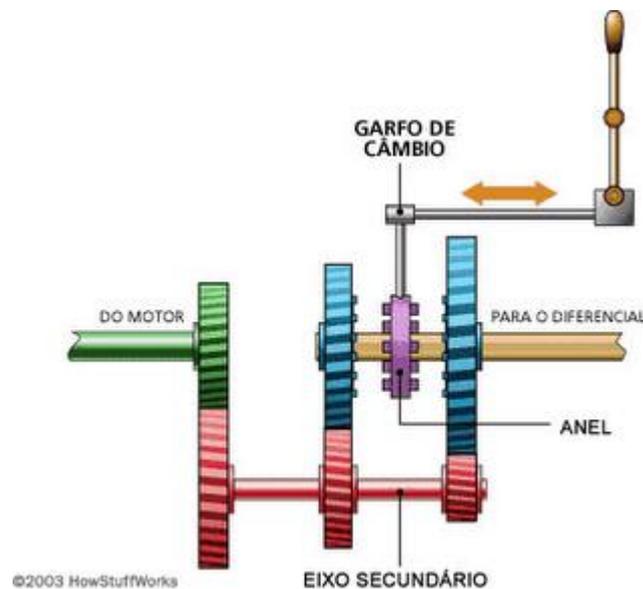
### 2.3.1 Câmbios

Os câmbios são essencialmente o sistema completo de transmissão, sendo estes acoplados ao motor e transmitindo a potência para as rodas. Os principais são: manual, automatizado, automático e CVT.

#### 2.3.1.1 Câmbio manual

A caixa de transmissão manual utiliza pares de engrenagens para transmitir a potência proveniente do motor para as rodas. Conforme Weihermann (2015), a caixa é composta de um eixo primário, o qual provém do motor, um eixo secundário, além do eixo de saída. A transmissão entre estes eixos é realizada através das engrenagens, que conforme a relação de transmissão entre elas, definem o torque e a rotação de saída. A Figura 7 ilustra o esquema simplificado de um câmbio manual.

Figura 7 - Esquema de câmbio manual



Adaptado de: Brain (2003)

Os principais elementos presentes num câmbio manual são as engrenagens, embreagem, anéis sincronizadores, eixos de transmissão e a alavanca para seleção de marcha. Assim, seu funcionamento consiste na utilização da embreagem para interromper a transmissão de potência

através dos eixos, e utilizando a alavanca para selecionar uma marcha, o anel sincronizador acopla o par de engrenagem correspondente.

Weihermann (2015) cita que este câmbio já foi um dos mais utilizados na indústria, sendo mais barato em relação a câmbios automáticos, tanto a produção quanto a sua manutenção. Entretanto, hoje, em 2022, a maioria dos carros já possuem transmissão automática em sua versão de entrada. Também possui a vantagem de o piloto controlar o momento de troca de marcha, o que proporciona utilização mais alongada de cada marcha, para quem o deseja. Entretanto, neste mesmo ponto pode-se considerar a desvantagem de necessidade de troca constante, além de que aumenta o consumo de combustível e pode ocorrer o desgaste prematuro de alguns componentes.

#### 2.3.1.2 Câmbio automatizado

O câmbio automatizado é semelhante ao câmbio manual, utilizando-se da mesma mecânica de funcionamento. Porém, o acionamento da embreagem e a troca de marchas não é feita pelo condutor, e sim por um mecanismo eletrônico. Assim, segundo Weihermann (2015), esta configuração combina a eficiência do câmbio manual com o conforto proporcionado por um câmbio automático, mas ainda assim há trancos durante a troca de marcha realizada pelo sistema.

Ainda segundo Weihermann (2015), a avaliação do momento da troca é realizada pelo sistema eletrônico, que através de algumas variáveis como rotação do motor, conclui que é necessária uma troca e qual a marcha a ser selecionada, assim aciona os atuadores para a mudança. Estes atuadores demandam um reservatório de óleo em alta pressão para o fluido hidráulico.

Como os princípios de funcionamento do câmbio automatizado são os mesmos do câmbio manual, suas vantagens e desvantagens são semelhantes. Porém, aumenta-se o conforto do motorista ao não necessitar trocar de marcha, ao que se diminui nos trancos ocasionados pela mudança automatizada enquanto o acelerador está pressionado. Para a manutenção, inclui-se um sistema eletrônico, o que pode acarretar um aumento nos custos.

### 2.3.1.3 Câmbio automático

A grande diferença dos câmbios manual e automatizado para um câmbio automático, conforme Nice (2000), é que enquanto o câmbio manual utiliza diferentes pares de engrenagens para as diferentes marchas, o câmbio automático utiliza um sistema de engrenagens, chamado de planetário. A Figura 8 exemplifica um esquema de engrenagem planetária. Assim, conforme o engrenamento das engrenagens, obtém-se diferentes relações de transmissão.

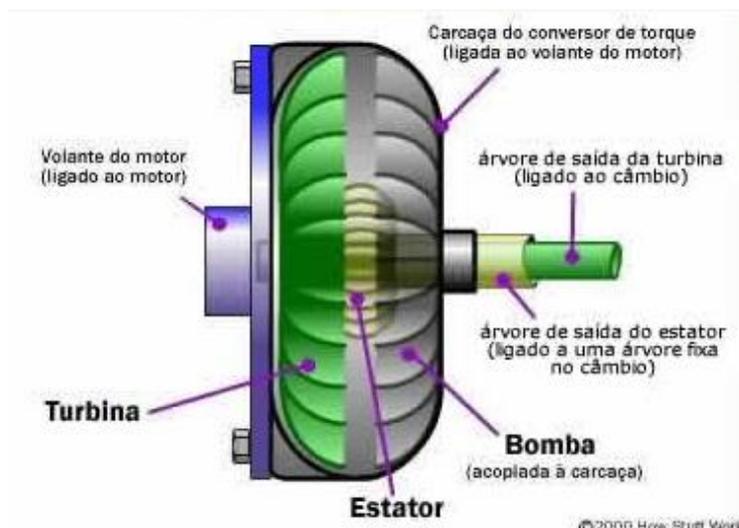
Figura 8 - Sistema de engrenagem planetária



Fonte: Pozelli (2022)

Em paralelo com a embreagem dos câmbios manuais, os câmbios automáticos utilizam um conversor de torque para desacoplar a transmissão do motor. O conversor de torque, conforme Nice (2000), permite o motor girar seu eixo de saída praticamente independente do sistema de transmissão, possuindo um acoplamento fluido. A Figura 9 mostra um conversor de torque com seus componentes.

Figura 9 - Conversor de torque



Adaptado de: Nice (2000)

Para seu funcionamento, a bomba gira na mesma rotação do motor, movimentando o fluido hidráulico até a turbina, a qual transmite a potência para o eixo da caixa de transmissão. O fluido movimenta-se em diferentes direções na bomba e na turbina, por isso é utilizado o estator, evitando que o fluido proveniente da turbina entre em contato direto com a bomba, o que ocasionaria perda de eficiência.

Este sistema se torna mais caro em relação aos câmbios automatizado e manual, além de dificultar a manutenção por ser um mecanismo mais complexo. Em termos de conforto, este possui melhores atributos, pois além de não possuir o pedal da embreagem, não possui solavancos em trocas de marchas.

#### 2.3.1.4 Câmbio CVT

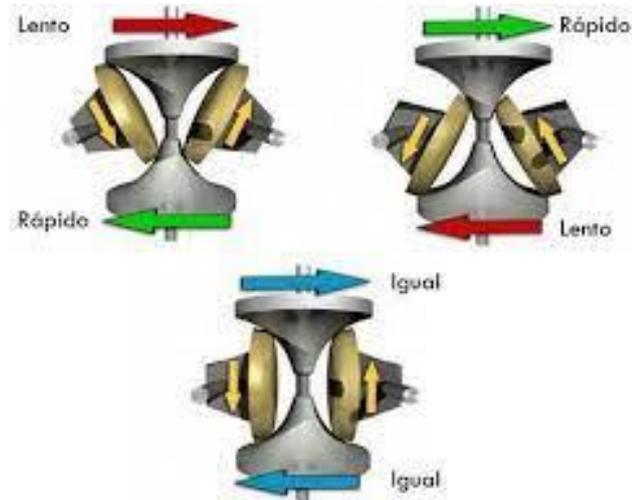
A transmissão CVT (*continuously variable transmission*), assim como o próprio nome sugere, varia continuamente a transmissão. Além disso, “a CVT possui um número infinito de marchas dentro de um intervalo de relação de transmissão” (OLIVEIRA, 2015). Assim, não se possui solavancos causados pela mudança de marchas.

Existem dois tipos de CVT que utilizam fricção: toroidal e por polias expansivas.

O CVT toroidal, mostrado pela Figura 10, utiliza discos e roletes. Assim, um dos discos é conectado ao motor, enquanto o outro é conectado à transmissão. A função dos roletes é transmitir a potência de um disco para o outro, conforme Harris (2005). A relação de

transmissão muda conforme a movimentação dos roletes, sendo estes livres para se movimentar em dois sentidos, tanto horizontal quanto vertical. Quando os roletes estiverem mais próximos a saída de potência, maior será o torque. O contrário é recíproco.

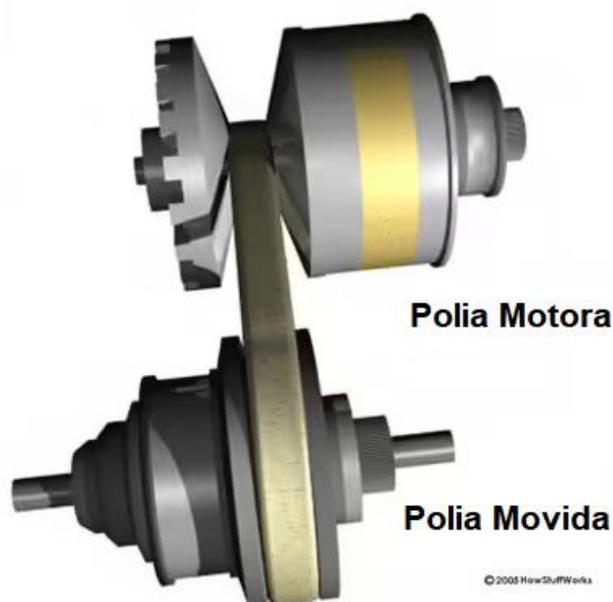
Figura 10 - CVT toroidal



Fonte: Weihermann (2015)

O CVT por polias expansivas (Figura 11) possui três componentes básicos, sendo estes a polia motora, a polia movida e por fim uma correia para realizar a transmissão. As polias do CVT, conforme Harris (2005), são feitas em formato de cone com um ângulo de 20°, o que possibilita a variação do diâmetro. Seu funcionamento consiste em conectar a polia motora no motor, e a polia movida faz a saída para o próximo componente do sistema, e ao variar a aceleração do motor, muda-se os diâmetros das polias, sendo que enquanto uma aumenta a outra diminui.

Figura 11 - Câmbio CVT



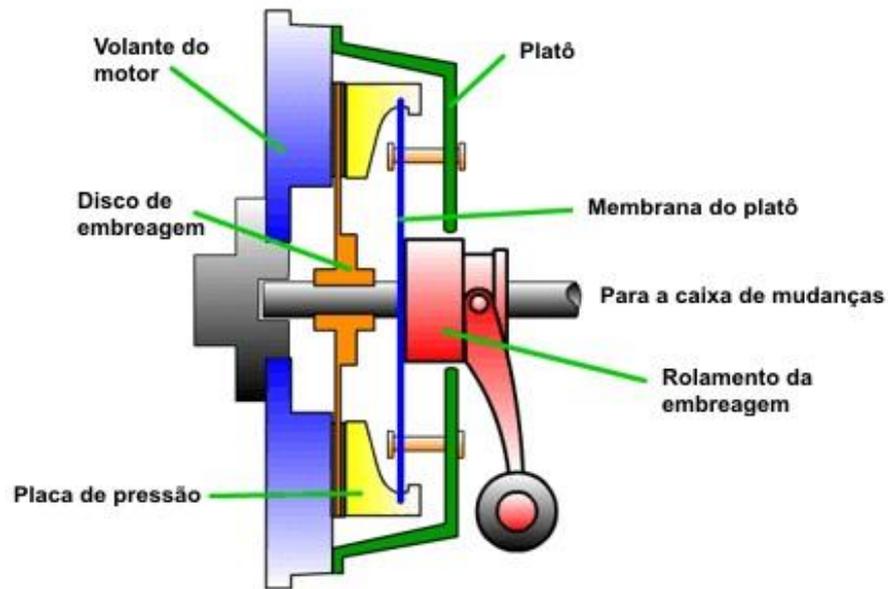
Adaptado de: Harris (2005)

### 2.3.2 Embreagem

Segundo Nice et al. (2007), a embreagem, mostrada em esquema pela Figura 12, em um veículo com câmbio manual tem a função de desacoplar o eixo do motor do eixo da caixa de transmissão, interrompendo a passagem de potência, e consequentemente podendo manter o motor em funcionamento enquanto se está parado. Seu princípio de funcionamento é baseado na fricção entre o disco de embreagem e o platô, onde com estes estando em contato, a fricção faz com que o movimento seja transmitido do motor até a caixa de redução. Ao pressionar o pedal da embreagem, um garfo desacopla os componentes, resultando na parada da transmissão de potência.

Conforme Nice et al. (2007), um problema comum das embreagens é o desgaste do material de fricção presente nas peças, onde em um caso de desgaste extremo, a embreagem não transmitirá movimento.

Figura 12 - Esquema de embreagem



Adaptado de: How Stuff Works (2007)

### 2.3.3 Elementos de Transmissão

#### 2.3.3.1 Engrenagens

A função das engrenagens, conforme Norton (2013), é transmitir torque e velocidade angular, e pode ser utilizada em uma ampla variedade de aplicações. Existem diferentes tipos de engrenagens, como a reta, helicoidais, as quais são cilíndricas, cônica, entre outras.

- **Engrenagens de Dentes Retos:** operam com eixos paralelos, transmitindo do eixo motor para o eixo movido. Esta é a mais simples das configurações. A Figura 13 mostra um par de engrenagens de dentes retos.

Figura 13 - Par de engrenagens de dentes retos



Fonte: Acoplast (2019)

- **Engrenagens Helicoidais:** são similares as engrenagens retas, porém possuem um ângulo nos dentes conhecido como ângulo de hélice ( $\Psi$ ) em relação ao seu eixo de rotação. Podem ser utilizadas em eixos paralelos e eixos não paralelos. A Figura 14 mostra um par de engrenagens helicoidais.

Figura 14 - Engrenagens helicoidais



Fonte: Fresadora Hipoyde (2022)

- **Engrenagens Cônicas:** ao contrário dos tipos supracitados, estas são cortadas em cones. O eixo do par de engrenagem é concorrente e seus dentes podem ser retos ou helicoidais. A Figura 15 demonstra um par de engrenagens cônicas com dentes helicoidais.

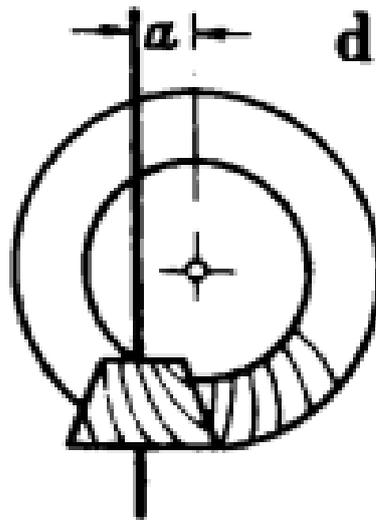
Figura 15 - Engrenagens cônicas



Fonte: Pozelli (2022)

- **Engrenagens cônicas descentradas (hipoidais):** são basicamente engrenagens cônicas, porém os centros das engrenagens não estão alinhados, estando distantes uma distância “a”, conforme mostra a Figura 16.

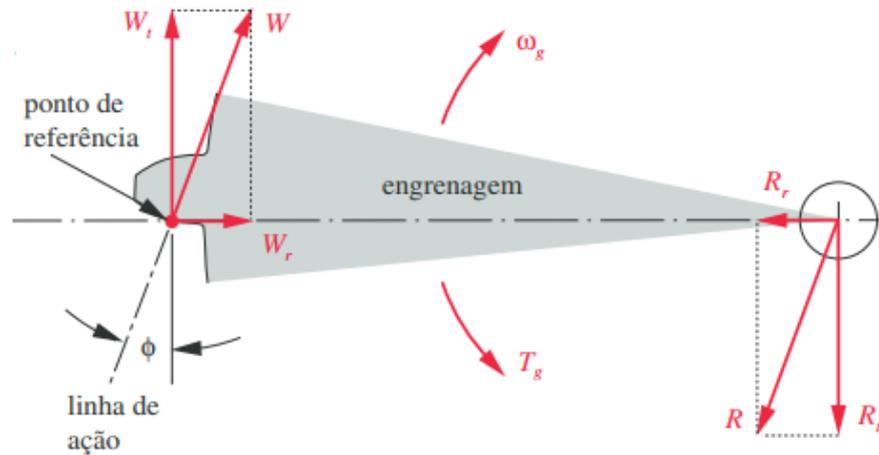
Figura 16 - Engrenagens hipoidais



Fonte: Niemann (1971)

As engrenagens retas possuem um ângulo de pressão ( $\phi$ ), como mostra a Figura 17, sendo este o ângulo entre a linha de ação e a direção da velocidade no ponto de referência, onde a linha de ação seja rodada no ângulo em questão na direção de rotação da engrenagem movida. O par de engrenagem deve ser feito utilizando o mesmo ângulo de pressão, sendo escolhido a partir de padrões 14,5°, 20° e 25°, sendo mais comum a utilização de 20°.

Figura 17 - Ilustração do ângulo de pressão



Adaptado de: Norton (2013)

Para o funcionamento da engrenagem, os dentes devem seguir a lei fundamental do engrenamento, que afirma que “a razão de velocidade angular das engrenagens de um par de engrenagens deve-se manter constante durante o engrenamento” (NORTON, 2013). Outro fator extremamente importante é a necessidade de o módulo das engrenagens serem iguais, caso contrário o engrenamento não ocorrerá da maneira correta. Isso se deve ao fato de o módulo influenciar na altura dos dentes das engrenagens, portanto cada engrenagem teria uma diferente altura no dente.

### 2.3.3.2 Correias

Existem diferentes formatos de correias, como planas e em V, sendo estas mostradas pela Figura 18, onde cada uma possui sua especificidade. Sua utilização, assim como a corrente de rolos, acontece, conforme Budynas (2016), em distâncias relativamente maiores, substituindo um trem de engrenagens por uma relação de polias e correia. Uma desvantagem de sua utilização é o fenômeno do escorregamento, o que não garante a constância na relação de velocidade angular em comparação à razão do diâmetro das polias.

Figura 18 - Formatos de correias



Adaptado de: GRV Correias (2014)

### 2.3.3.3 Corrente de rolos

É um elemento de transmissão flexível, que assim como as correias são utilizadas em distâncias maiores. Segundo Budynas (2016), as características desta transmissão são: ter a razão constante, pois não está sujeita a escorregamento. Possui uma vida longa e permite o acionamento de diversos eixos através de uma fonte de potência. A Figura 19 traz uma corrente de rolos.

Figura 19 - Corrente de rolos



Fonte: Engrenagem (2022)

### 2.3.3.4 Eficiência na transmissão

Sabe-se que na prática, a potência entregue pelo motor não é fornecida ao total para as rodas. Isso ocorre devido a perdas durante os sistemas de redução ocasionadas por atrito,

escorregamento, entre outros fatores. A relação entre o torque de saída e o torque entregue é a eficiência do sistema de transmissão.

Para garantir a manutenção da eficiência esperada, é necessário revisar periodicamente os componentes do sistema de transmissão. Em um câmbio CVT por polias, por exemplo, o tempo de vida da correia influencia diretamente na eficiência, onde correias com pouco uso podem, conforme Bresolin (2012), prover ganhos de até 20% na eficiência para determinadas faixas de velocidade.

Durante o dimensionamento de um sistema, deve-se considerar a eficiência, aplicando-se um fator de correção para compensar as perdas.

#### **2.3.4 Lubrificação**

A lubrificação é extremamente importante para evitar falhas prematuras dos componentes, sendo causadas principalmente pelo desgaste ocorrido pelo atrito entre os dentes, no caso das engrenagens. Também se controla a temperatura local, sendo o calor do atrito transferido da superfície para o ambiente. Além das engrenagens, outros componentes como mancais, rolamentos e correntes também necessitam de lubrificação para diminuição do atrito e consequente melhoria da vida útil das peças.

Conforme Norton (2013), o mais comum é utilizar banho de óleo nas engrenagens, o que requer uma caixa vedada. Neste caso, necessita-se banho parcial em pelo menos um dos componentes do par engrenado. Outra possibilidade é a utilização de graxa, a qual deve ser aplicada periodicamente em períodos de manutenção. Porém, a graxa é menos eficiente na remoção do calor, além de ser recomendada para baixa velocidade e baixa carga nas engrenagens.

Conforme Abecom (2021), existem duas formas de lubrificação a óleo: lubrificação por salpico e por circulação forçada. A primeira consiste na utilização da velocidade de rotação da engrenagem para que esta jogue o óleo no restante do conjunto. Já a segunda necessita a utilização de uma bomba de óleo, podendo o fluido ser aplicado por gotejamento, aspersão ou névoa.

Para a aplicação, diferentes métodos podem ser utilizados, sendo eles: lubrificação por gravidade; lubrificação por capilaridade; lubrificação por salpico; lubrificação por imersão; lubrificação por sistema forçado e lubrificação com graxa.

### 2.3.5 Dimensionamento da relação de transmissão

O dimensionamento da relação de transmissão é um importante passo para a definição do sistema a ser utilizado, podendo ser considerado um requisito de projeto durante a metodologia. Para o seu dimensionamento, a metodologia de Gillespie (1992) calcula a força de tração no solo. A Equação (6) mostra o cálculo da força.

$$F_x = \frac{\mu \cdot W_e \cdot b}{1 - \frac{h \cdot \mu}{L}} \quad (6)$$

Onde:

$F_x$ : Força de tração no solo

$W_e$ : Peso distribuído no eixo de tração

$\mu$ : Coeficiente de atrito entre pneu e solo

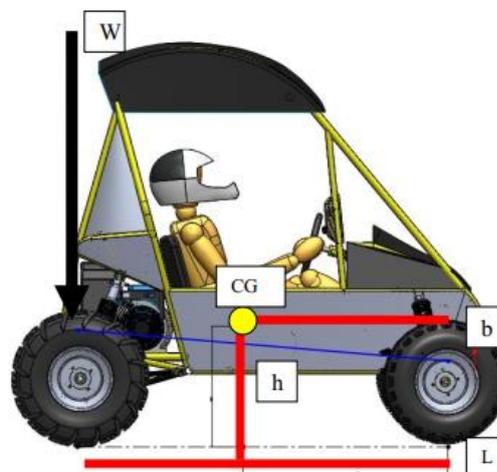
$b$ : Distância do centro de gravidade do veículo com o piloto ao eixo livre

$h$ : Altura do centro de gravidade com o piloto em relação ao solo

$L$ : Distância entre eixos

A Figura 20 mostra a representação das distâncias da equação (6), sendo CG o centro de gravidade.

Figura 20 - Representação das distâncias apresentadas na Equação 6



Fonte: Equipe Piratas do Vale de Baja SAE (2015)

Antes de calcular a relação de transmissão ainda é necessário dimensionar o torque no pneu. Sabendo que o torque é definido por  $x$  distância, a equação de torque é definida conforme a Equação (7):

$$T_x = F_x \cdot r_{pneu} \quad (7)$$

Sendo:

$T_x$ : Torque de tração no solo

$F_x$ : Força de tração no solo

$r_{pneu}$ : Raio do pneu

Finalmente, calcula-se a relação de transmissão, que é a relação entre o torque de saída e o torque de entrada. A Equação (8) apresenta também a redução de um câmbio CVT no cálculo, e caso este não seja utilizado, basta retirá-lo da equação para obter a redução total do sistema de transmissão.

$$i_{red} = \frac{T_x}{T_m \cdot i_{CVT}} \quad (8)$$

Onde:

$i_{red}$ : Relação de transmissão do sistema

$T_x$ : Torque de tração no solo

$T_m$ : Torque de saída do motor

$i_{CVT}$ : Redução do CVT

### 2.3.6 Dimensionamento de engrenagens de dentes retos

O principal parâmetro da engrenagem é o módulo. Este é definido através da escolha da ferramenta que realizará a usinagem da peça. Assim, pode-se definir os parâmetros geométricos juntamente com o número de dentes da engrenagem. A Tabela 2 compila algumas equações referentes a geometria conforme a bibliografia de Cunha (2005).

Tabela 2 - Parâmetros geométricos da engrenagem

<b>Especificação</b>	<b>Equação</b>
Diâmetro primitivo	$D_p = m * Z$
Diâmetro externo	$D_e = D_p + 2 * m$
Diâmetro interno	$D_i = D_p - 2,4 * m$
Ângulo de pressão	geralmente $20^\circ$

Adaptado de: Cunha (2005)

Onde:

$m$ : Módulo

$Z$ : Número de dentes

$\phi$ : Ângulo de pressão

$D_p$ : Diâmetro primitivo

$D_e$ : Diâmetro externo

$D_i$ : Diâmetro interno

A fim de calcular os esforços atuantes nas engrenagens é necessário primeiramente dimensionar as forças que estão presentes em cada par engrenado, relacionando assim com o torque transmitido no eixo.

As forças atuantes nos dentes durante o engrenamento atuam, conforme Norton (2013), na linha de ação do ângulo de pressão e no ponto primitivo. Assim, possui-se duas componentes de forças, uma na direção radial e a outra na direção tangencial. A Equação (9) traz o cálculo da força tangencial.

$$W_t = \frac{T_p}{r_p} \quad (9)$$

Onde:

$W_t$ : Força tangencial

$W_r$ : Força radial

$W$ : Força resultante

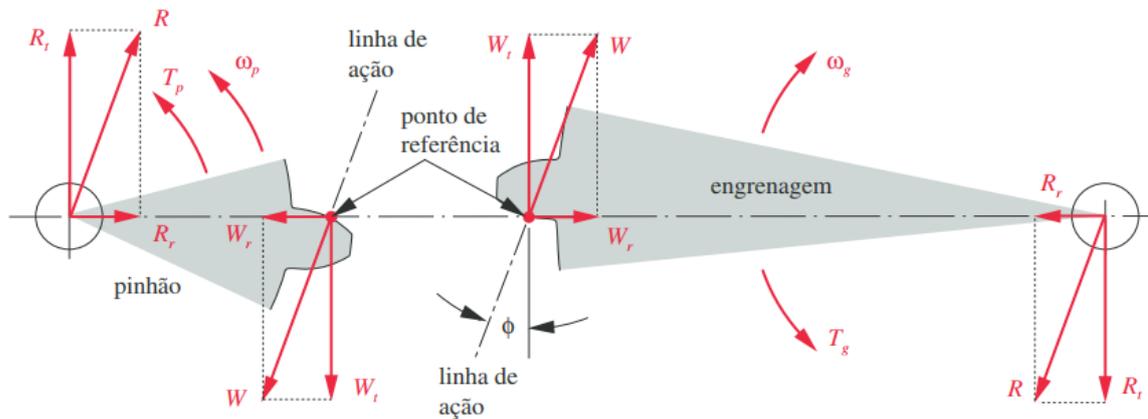
$T_p$ : Torque aplicado na engrenagem

$r_p$ : Raio primitivo da engrenagem

$\phi$ : Ângulo de pressão

A Figura 21 apresenta as forças atuantes nos dentes. Apesar de a imagem representar os dentes separadamente, as forças só ocorrem enquanto estiver ocorrendo engrenamento nos dentes em questão. Além disso, a força resultante no par é a mesma, mudando apenas o sentido de atuação. Pode-se considerar que no pinhão as forças são as motrizes, e numa análise estática, as forças da coroa são reações para encontrar o equilíbrio. Isso ocorre apenas no ponto primitivo.

Figura 21 - Forças atuantes



Fonte: Norton (2013)

Com o dimensionamento das forças atuantes, pode-se calcular a tensão de flexão. Para isso, Norton (2013) e Budynas (2016) trazem a equação de tensão AGMA (*American Gear Manufacturers Association*). As duas bibliografias trazem versões com pequenas divergências em alguns fatores, porém ao final o resultado a ser obtido é o mesmo. A Equação (10) mostra a equação conforme Budynas (2016).

$$\sigma_b = W_t \cdot K_o \cdot K_v \cdot K_s \cdot \frac{1}{b \cdot m} \frac{K_m \cdot K_b}{J} \quad (10)$$

Onde:

$\sigma_b$ : Tensão AGMA

$W_t$ : Força tangencial

$K_O$ : Fator de sobrecarga

$K_v$ : Fator dinâmico

$K_S$ : Fator de tamanho

$K_m$ : Fator de distribuição de carga

$K_b$ : Fator de espessura de aro (borda)

$J$ : Fator geométrico

$b$ : Largura da face

$m$ : Módulo

O fator dinâmico ( $K_v$ ) corrige imprecisões na produção e engrenamento dos dentes. Seu valor é definido através dos cálculos mostrados pelas Equações (11), (12) e (13).

$$K_v = \left( \frac{A + \sqrt{200 \cdot v}}{A} \right)^B \quad (11)$$

$$A = 50 + 56 \cdot (1 - B) \quad (12)$$

$$B = 0,25 \cdot (12 - Q_v)^{2/3} \quad (13)$$

Sendo:

$K_v$ : Fator dinâmico

$Q_v$ : Número de qualidade

$v$ : Velocidade tangencial

O número de qualidade é definido de 3 a 7 para engrenagens de qualidade comercial e de 8 a 12 para qualidade precisa. A velocidade tangencial é dada conforme a Equação (14).

$$v = \frac{\pi \cdot n \cdot D_p}{6000} \quad (14)$$

Onde:

$v$ : Velocidade tangencial

$n$ : Rotação

$D_p$ : Diâmetro primitivo

O fator de sobrecarga ( $K_o$ ) considera as cargas externas que são geradas pelo impacto nos dentes das engrenagens. Pode-se obter seu valor conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Fator de sobrecarga

<b>Máquina motora</b>	<b>Máquina movida</b>		
	<b>Uniforme</b>	<b>Choque moderado</b>	<b>Choque severo</b>
Uniforme	1	1,5	1,75 ou mais
Choque leve	1,25	1,5	2,00 ou mais
Choque médio	1,5	1,8	2,25 ou mais

Adaptado de: Norton (2013)

O fator de tamanho ( $K_s$ ) “reflete a não uniformidade das propriedades do material causada pelo tamanho” (BUDYNAS, 2016). Porém, por não existir fatores padronizados, geralmente utiliza-se o valor unitário.

A compensação que o fator de distribuição de carga ( $K_m$ ) traz é em relação a possíveis defeitos na montagem ou nos dentes, distribuindo a carga de forma desigual sobre a largura da face. Neste ponto as referências trazem diferentes considerações. Enquanto Norton (2013) traz as informações da Tabela 4, Budynas (2016) apresenta equações considerando as distâncias entre a engrenagem e os mancais. Como neste ponto do trabalho não se espera possuir distâncias corretas entre os mancais pela necessidade de ainda estimar a largura dos pares, optou-se pela utilização das considerações de Norton (2013).

Tabela 4 - Fator de distribuição de carga

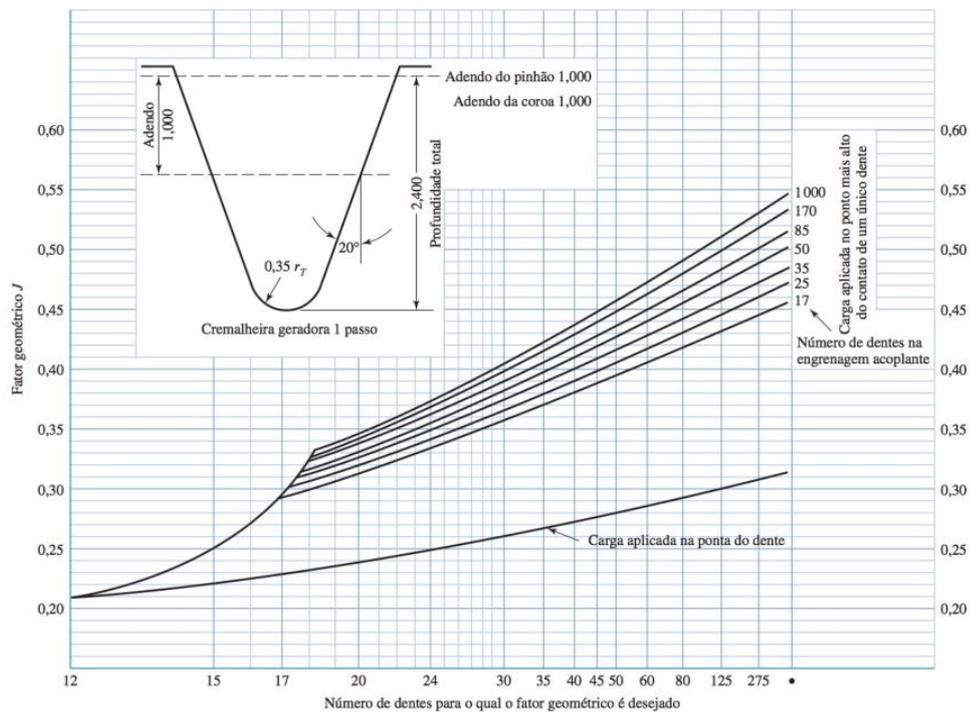
<b>Largura da face (mm)</b>	<b><math>K_m</math></b>
< 50	1,6
150	1,7
250	1,8
$\geq 500$	2,0

Adaptado de: Norton (2013)

O fator de espessura de borda ( $K_B$ ) considera a possibilidade de a espessura de aro não suportar a raiz do dente, ocasionando falha. Geralmente utiliza-se o valor unitário para este fator.

Por fim, o fator geométrico ( $J$ ) é o fator correspondente a resistência de flexão. Este é obtido através da Figura 22, sendo as variáveis de entrada o número de dentes do par engrenado.

Figura 22 - Fator geométrico de resistência a flexão



Fonte: Budynas (2016)

## 2.4 MOTOR DO VEÍCULO

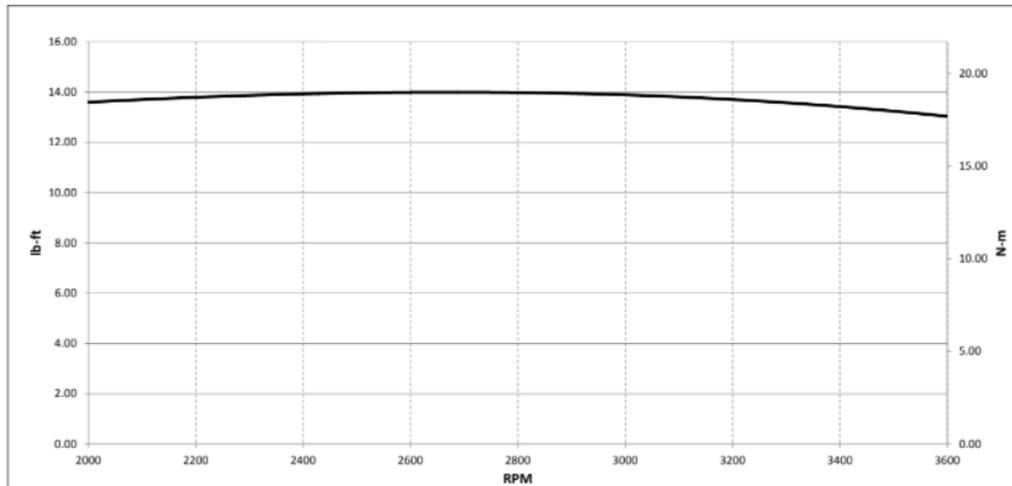
O motor utilizado na competição é padrão para todas as equipes, sendo necessário todos os itens de fábrica. O modelo da equipe Ibirubaja é *Briggs & Stratton OHV Intek Model 20*, mostrado na Figura 23. Este possui apenas um cilindro, além de potência de 10HP e torque máximo em torno de 18,65Nm com rotação de 2600rpm. Estas informações estão disponíveis na curva de torque, mostrada pela Figura 24.

Figura 23 - Motor do Baja



Fonte: Briggs&amp;Stratton (2022)

Figura 24 - Curva de torque



Fonte: Briggs &amp; Stratton (2022)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto da caixa de transmissão para o veículo Baja foi realizado principalmente através da metodologia de Back et al. (2008) e auxílio de ferramentas de Pahl et al. (2005), descritas anteriormente no referencial teórico, onde utilizando-se seus processos buscou-se um conceito de produto que atendesse aos requisitos apontados.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DO PROJETO

Iniciou-se o planejamento estabelecendo o escopo do projeto. As atividades a serem realizadas são:

- Pesquisa teórica sobre a metodologia de projeto do produto;
- Pesquisa teórica sobre os elementos que compõe um sistema de transmissão;
- Realização das atividades de cada etapa;
- Escolha da concepção que atende aos requisitos e objetivos do trabalho;
- Realização dos cálculos teóricos;
- Modelagem em *software* da concepção;
- Análise dos resultados obtidos.

Posteriormente, passou-se para o estabelecimento dos objetivos, geral e específicos, os quais são os alvos a serem atingidos ao final do trabalho. As metas estabelecidas são as mesmas estipuladas neste TCC, consistindo em projetar uma caixa de transmissão para o veículo Baja SAE da equipe Ibirubaja como objetivo geral. Além dos objetivos específicos supracitados, também se propõe alguns atributos para o sistema de transmissão, como otimização de peso, visar o baixo custo de produção, e prover marcha ré, a qual pode ser de grande valia na competição, mostrando-se um diferencial no veículo.

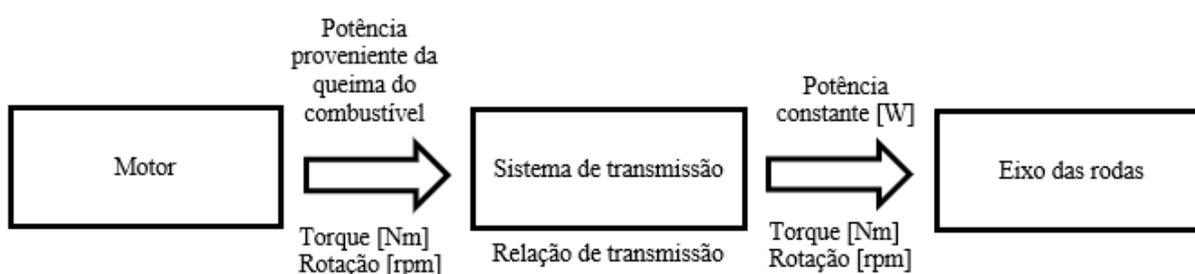
A principal restrição apresentada no projeto é econômica, assim, o custo estimado de produção deve ser de até R\$3000,00, sendo este um limite aceitável para a equipe custear.

Nota-se que esta etapa não contou com um cronograma para estimar o tempo de cada tarefa. Isso se deve ao fato de o trabalho ser realizado apenas pelo autor, avançando nas etapas conforme a possibilidade, porém o prazo final de entrega do trabalho deve ainda ser atendido.

### 3.2 PROJETO INFORMACIONAL

Nesta etapa da metodologia inicia-se os estudos referente a requisitos de usuário e de projeto os quais são as referências dos próximos passos da criação do conceito de produto. A síntese do equipamento é mostrada pela Figura 25, onde o sistema recebe a potência do motor, sendo esta desmembrada em torque e rotação. Considerando que não existem perdas, a potência na saída é a mesma da entrada, logo a relação de transmissão modifica apenas os valores do torque e rotação para entregar essa ao eixo.

Figura 25 - Síntese do equipamento



Fonte: Autor (2022)

Para iniciar a construção da casa da qualidade, conversou-se com os membros da equipe Ibirubaja em busca de características necessárias na transmissão de potência, visto que eles participaram da competição Baja Sul, em Caxias de Sul, no ano de 2019, possuindo contato com outras equipes, além de terem vivenciado as provas.

O campo I, que trata das necessidades do usuário, foi retirado pois a conversa com os participantes da equipe, os quais já possuem conhecimento técnico e em metodologia de projeto de produto, resultou diretamente nos requisitos de usuários, sendo estes: rapidez na troca de marchas; robustez; durabilidade; ser barato; possuir fácil manutenção e ser simples.

A partir dos requisitos alocados no campo II, atribuiu-se o grau de importância levando em consideração o que foi observado como necessário, além do julgamento do que é preciso no protótipo no momento, com uma visão de usuário. O campo referente ao produto da empresa foi preenchido conforme o equipamento que estava instalado, utilizando uma caixa de transmissão manual de motocicleta, onde as trocas ocorriam por alavanca e possuía-se problemas no engate, o que pode ter ocasionado o desgaste prematuro e conseqüentemente quebra de alguns componentes, fato que também levou ao desenvolvimento deste trabalho.

Posteriormente atribuiu-se o valor meta, considerando o quanto pretende-se atingir os requisitos no projeto, onde enfatizou-se a robustez do equipamento para evitar quebras como aconteceu na transmissão anterior. Além disso, o fator de venda também foi adicionado visando um possível marketing de venda para outras equipes. Assim, realizou-se os cálculos da taxa de melhoramento, do peso absoluto e do peso do requisito do usuário e finalizou-se o campo V de planejamento da qualidade.

O próximo passo foi realizar a tradução dos requisitos de usuário em características de engenharia. Para isso, buscou-se transformar os itens já descritos de uma forma que ficassem coerentes com o que a metodologia pede, ou seja, que possam ser mensuráveis. Assim, chegou-se aos seguintes itens listados juntamente com o sinal de medição que indica a maximização ou minimização do requisito:

- Otimizar a massa (+);
- Ter dimensões adequadas ao carro (+);
- Ter vida útil adequada (+);
- Suportar os esforços submetidos (+);
- Possuir torque adequado (+);
- Ser de baixo custo (+);
- Ter velocidade máxima adequada (+).

Nota-se que alguns requisitos de usuário não possuem equivalência em requisitos de engenharia, como a rapidez na troca de marchas, fácil manutenção e simplicidade, pois são qualitativos e não quantitativos. Porém, estes não serão desconsiderados no decorrer do projeto. A relação de transmissão do sistema, citado como um possível requisito de projeto no item 2.3.5, já está relacionada com dois requisitos, o torque e a velocidade, por isso considerou-se redundante a sua adição na casa da qualidade.

Com a adaptação feita, bastou relacionar as linhas e colunas conforme o grau, forte, moderado ou fraco e após o término, realizar os cálculos de peso de importância e importância relativa para assim listar em ordem decrescente as características de engenharia na redação de projeto.

Para finalizar a casa da qualidade, o último passo se dá ao relacionar os requisitos de projeto entre os mesmos referente aos sinais previamente estipulados em positivo (V), negativo (X) e sem relação, deixando o campo em branco.

A Figura 26 mostra a casa da qualidade completa.

O quadro de opinião dos clientes foi excluído da casa da qualidade pois não será realizado a comparação direta. Assim, o *benchmarking* se torna apenas uma ferramenta de busca de conhecimento de outros protótipos Baja, obtendo através da pesquisa em trabalhos diferentes concepções de caixa de transmissão, porém com a maioria utilizando um câmbio CVT e uma caixa de redução, onde essa é desenvolvida especificamente para cada carro.

Figura 26 - Casa da Qualidade

CORRELAÇÃO ENTRE CE's																
V - Positivo X - Negativo																
Grau de relacionamento entre Requisitos de Usuários e Requisitos de Projeto  Forte = 5 Moderado = 3 Fraco = 1		+ Otimizar a massa	+ Ter dimensões adequadas ao carro	+ Ter vida útil adequada	+ Suportar aos esforços submetidos	+ Possuir torque adequado	+ Ser de baixo custo	+ Ter velocidade máxima adequada	Somas	GRAU DE IMPORTÂNCIA, gi = 1 a 5	PRODUTO DA EMPRESA A	Plano de qualidade, valor meta (vi,m)	Taxa de melhoramento, trni	Fatores de venda, fvi=1,5; 1,2 e 1,0	Peso absoluto, pai	Peso do requisito do usuário, prui (%)
Rapidez na troca de marchas	1			1	3		5		5	1	4	4,00	1,5	30,00	50,6%	
Robustez	2	5	3	3	5	5		3	4	2	5	2,50	1,2	12,00	20,2%	
Durabilidade	3	1		5	3				3	2	3	1,50	1	4,50	7,6%	
Barato	4	5	3	1	3	3	5	3	4	4	3	0,75	1,2	3,60	6,1%	
Fácil manutenção	5		3				3		5	3	3	1,00	1,2	6,00	10,1%	
Simplicidade	6	1					3		4	5	4	0,80	1	3,20	5,4%	
PESO DE IMPORTÂNCIA		1,4	1,1	1,6	2,9	1,2	3,3	0,8	30					59,30	100%	
IMPORTÂNCIA RELATIVA (%)		11,7%	8,9%	12,6%	23,9%	9,7%	26,8%	6,4%								
UNIDADES		kg	m	ano	N	Nm	R\$	km/h								
VALOR META		20	0,3x0,3x0,2	1	18,65	370	3000	60								

Fonte: Autor (2020)

Os valores meta, foram definidos através de estimativas e análises dos modelos em CAD, como nas dimensões, com exceção do torque adequado, onde neste ponto não se tinha uma base para estimar qual o torque adequado para o veículo. Assim, posterior ao cálculo de torque, adicionou-se o valor meta para o requisito. Outro detalhe é o parâmetro utilizado para os esforços. Sabe-se que tensão é mensurada, geralmente, em MPa. Foi utilizado o maior torque proveniente do motor como parâmetro pois este acarretará o máximo esforço dos componentes.

Com o término da casa da qualidade, inicia-se a redação dos requisitos de engenharia, conforme a Tabela 5, ordenando as características em ordem decrescente, adicionando a

unidade e o valor meta, além do modo de verificação e possíveis riscos de violação. Procurou-se modos compatíveis de análise para cada requisito a fim de facilitar a verificação, tornando-a simples e efetiva.

Tabela 5 - Redação dos requisitos de caixa de transmissão

Classificação		Descrição do requisito	Unidade	Valor Meta	Modo de verificação	Possíveis riscos
1°	26,8%	Ser de baixo custo	R\$	3000	Estimativa, comparação de preços	Inviabilizar a produção do protótipo por ser muito caro.
2°	23,9%	Suportar os esforços submetidos	N	18,65	Cálculos	Dispositivo falhar, podendo causar danos ao equipamento e outros dispositivos ligados ao mesmo.
3°	12,6%	Ter vida útil adequada	ano	1	Estimativa	Falha precoce no dispositivo ocasiona em maiores custos e possíveis danos em outros equipamentos.
4°	11,7%	Otimizar a massa	kg	20	CAD	Dispositivo com peso elevado reduz a performance do veículo.
5°	9,7%	Possuir torque adequado	Nm	370	Cálculos	O carro pode não ter força suficiente para realizar as provas.
6°	8,9%	Ter dimensões adequadas ao carro	M	0,3x0,3x0,2	Medição do chassi através de CAD e estimativa	Equipamento não poder ser instalado no veículo.
7°	6,4%	Ter velocidade máxima adequada	km/h	60	Estimativa	Desempenho nas provas dinâmicas ser ruim, baixando a pontuação.

Fonte: Autor (2020)

Os possíveis riscos resultados por uma falha no cumprimento das condições apontadas também foram redigidos de forma simples e clara visando um entendimento rápido e correto para assim realizar uma melhor avaliação durante a modelagem da caixa de transmissão.

Por fim, montou-se a Tabela 6 com atributos considerados importantes, porém que não puderam ser considerados requisitos de projeto na casa da qualidade por não serem mensuráveis.

Tabela 6 - Atributos do projeto

<b>Atributos</b>
<b>Transferir potência do eixo do motor ao eixo das rodas</b>
<b>Prover marcha ré</b>
<b>Ser simples</b>
<b>Possuir fácil manutenção</b>

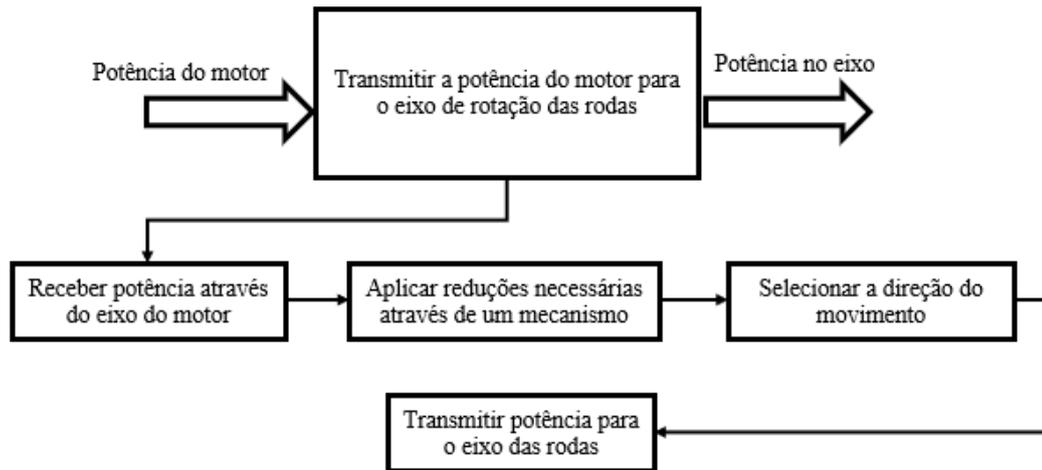
Fonte: Autor (2022)

### 3.3 PROJETO CONCEITUAL

Com os requisitos prontos, inicia-se a terceira fase da metodologia, o projeto conceitual, onde o seu resultado é a concepção do produto, mediante avaliação de outras propostas desenvolvidas através da matriz morfológica, além da utilização do fluxograma da função global, estabelecendo o essencial para o desenvolvimento do protótipo.

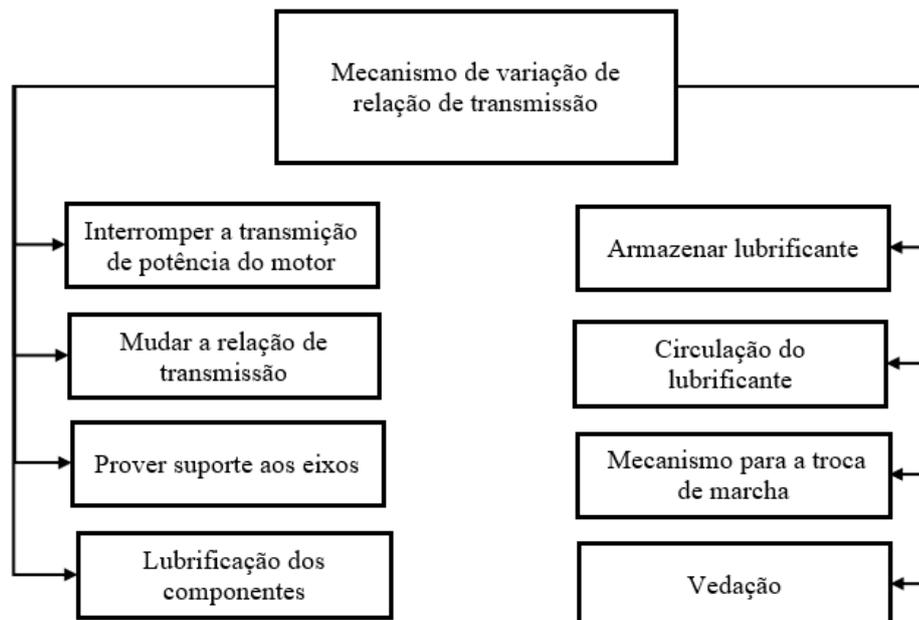
Assim, a função principal da caixa de transmissão é transferir potência do eixo do motor para o eixo das rodas do carro. Desmembrando as subfunções, percebe-se que o funcionamento geral é simples, recebendo potência, aplicando reduções e por fim entregando ao eixo. A Figura 27 mostra o fluxograma construído para o presente trabalho. Porém, seu funcionamento como um todo é complexo, portanto, realizou-se um desmembramento para elencar novas subfunções que aparecem dentro dos processos realizados considerando a variação na relação de transmissão, equivalente a troca de marchas. Estas subfunções são mostradas pela Figura 28.

Figura 27 – Função global da caixa de transmissão



Fonte: Autor (2022)

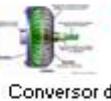
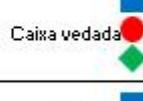
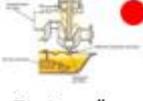
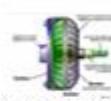
Figura 28 - Desdobramento das subfunções



Fonte: Autor (2022)

Com as funções e subfunções definidas, construiu-se a matriz morfológica (Figura 29), buscando diferentes mecanismos que possam cumprir as determinadas funções de maneira satisfatória.

Figura 29 - Matriz morfológica do sistema de transmissão

Subfunção	Soluções						
Receber potência através do eixo do motor	 Acoplamento elástico	 Engrenagens helicoidais	 Engrenagens cônicas	 Engrenagens de dentes retos	 Corrente	 Correia	 Direta
Interromper a transmissão de potência do motor	 Embreagem	 CVT por polia	 Conversor de torque	 CVT Toroidal			
Mudar a relação de transmissão	 Engrenagens de dentes retos	 Engrenagens helicoidais	 Corrente	 Correia	 CVT por polia	 CVT Toroidal	 CVT de carro
Transmissão de potência para o eixo das rodas	 Acoplamento elástico	 Engrenagens helicoidais	 Engrenagens cônicas	 Engrenagens retas	 Corrente	 Correia	
Prover suporte aos eixos	 Mancais	 Rolamentos	 Mancal de bronze	 Mancal de flange			
Lubrificação dos componentes	 Graxa	 Óleo lubrificante					
Armazenamento do lubrificante	 Caixa vedada	 Reservatório externo					
Circulação do lubrificante	 Por imersão	 Por salpico					
Mecanismo para a troca de marcha	 Alavanca com garfo	 CVT por polia	 Conversor de torque	 CVT Toroidal			
Vedação	 Retentores						

Fonte: Autor (2022)

Assim, foram obtidas 5 concepções, apesar da possibilidade de se ter um número muito maior combinando os diferentes itens. Cada concepção foi baseada em uma forma geométrica, onde a legenda é mostrada pela Figura 30.

Figura 30 - Legenda das concepções



Fonte: Autor (2022)

- **Concepção 1:** Esta concepção conta com acoplamento elástico para transmissões entre eixos e a utilização do CVT de polias como mecanismo de interrupção de transmissão de potência o que possibilita a utilização de marcha ré, sendo realizada a mudança com o carro parado. Com a pesquisa feita anteriormente, sabe-se que apenas um CVT não é suficiente na utilização, assim uma caixa de redução com engrenagens retas também seria utilizada.

- **Concepção 2:** A concepção 2 é semelhante à anterior, porém no lugar de uma caixa de redução de engrenagens, utiliza-se outro CVT por polias, e a transmissão final para o eixo é feita por corrente de rolos.

- **Concepção 3:** Esta utiliza um conversor de torque, que é ligado diretamente ao eixo do motor, onde juntamente com uma redução por engrenagens possibilita a marcha ré. A transmissão final também é realizada por corrente.

- **Concepção 4:** Semelhante ao câmbio manual de um carro, assim utiliza embreagem e caixa de marchas.

- **Concepção 5:** CVT de automóvel.

Com as possibilidades definidas através da matriz morfológica, foi realizado uma análise inicialmente dos atributos, avaliando se concepção pode atender ou não, e por fim uma análise de sensibilidade, quantificando os itens conforme os requisitos apontados.

A Tabela 7 mostra a avaliação feita quanto aos atributos. Considerou-se que um conversor de torque torna o sistema mais complexo. Este também possui uma manutenção mais difícil em comparação as concepções 1 e 2, assim como a utilização de uma embreagem pode tornar inviável a manutenção do sistema de transmissão durante uma competição.

Tabela 7 - Avaliação de atributos

Atributos	Concepção atende ao atributo?				
	Concepção 1	Concepção 2	Concepção 3	Concepção 4	Concepção 5
Transferir potência do eixo do motor ao eixo das rodas	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Prover marcha ré	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Ser simples	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Possuir fácil manutenção	Sim	Sim	Não	Não	Não

Fonte: Autor (2022)

A Figura 31 traz a análise de sensibilidade das concepções. O peso de cada critério não possui distinção, considerando 10 para todos. Assim, percebe-se que as concepções 1, 2 e 4 obtiveram pontuações próximas por possuírem alguns componentes iguais.

Figura 31 - Análise das concepções

Critérios de seleção	Pesos dos critérios	Concepções geradas									
		Concepção 1		Concepção 2		Concepção 3		Concepção 4		Concepção 5	
		$u_{i,2}$	$w_i * u_{i,1}$	$u_{i,2}$	$w_i * u_{i,2}$	$u_{i,3}$	$w_i * u_{i,3}$	$u_{i,4}$	$w_i * u_{i,4}$	$u_{i,5}$	$w_i * u_{i,5}$
Entrada de potência	10	8	80	8	80	10	100	10	100	6	60
Mecanismo de redução	10	8	80	9	90	8	80	8	80	9	90
Saída de potência	10	8	80	7	70	7	70	7	70	8	80
Custos	10	9	90	8	80	7	70	9	90	7	70
Suportar esforços	10	9	90	7	70	8	80	8	80	8	80
Otimização de massa	10	7	70	8	80	7	70	7	70	7	70
Simplicidade	10	8	80	8	80	6	60	8	80	6	60
Fácil manutenção	10	8	80	9	90	6	60	6	60	6	60
Valor da função		650		640		590		630		570	
Ordenação das concepções		1ª Posição		2ª Posição		4ª Posição		3ª Posição		5ª Posição	

Fonte: Autor (2022)

Assim, combinando as duas análises, chegou-se à conclusão de que a concepção 1 é a que melhor atende os requisitos, combinando a robustez das engrenagens de dentes retos com a versatilidade do câmbio CVT por polias. O modelo em questão obteve a maior pontuação da análise de sensibilidade com uma pequena diferença para a segunda e terceira colocadas, além de atender todos os atributos analisados anteriormente.

### 3.4 PROJETO PRELIMINAR

A partir da concepção escolhida, inicia-se o dimensionamento das engrenagens que farão parte da caixa de transmissão. Para isso, deve-se saber a motorização e o câmbio CVT que será utilizado.

Como a equipe Ibirubaja não possui um câmbio CVT no momento do desenvolvimento deste trabalho, foi necessário escolher um modelo. Assim, escolheu-se o câmbio CVT da marca Comet, série 700. Sua seleção se deu pela similaridade com o motor, além deste modelo ser utilizado em outro protótipos Baja e seu custo não ser tão elevado. Também foi uma sugestão de membros da equipe Ibirubaja e de integrantes de outras equipes. Porém, a maior desvantagem é a não abundância de peças de reposição para este modelo.

O modelo Comet 780 possui a redução mínima de 0,69:1 e como redução máxima 3,71:1. Estas informações serão utilizadas para o cálculo da relação de transmissão da caixa de redução.

### 3.4.1 Cálculo da relação de transmissão

Para facilitar a documentação do processo, criou-se uma planilha em *Excel*, o que possibilita uma fácil modificação pela equipe no decorrer dos anos, sendo essa uma base para os cálculos do sistema de transmissão.

Iniciou-se utilizando a Equação (6) para estimar a força máxima de tração entre o pneu e o solo. O peso e as dimensões referentes ao veículo foram estimados através da montagem do chassi no *software* CAD, visto que não se possui documentação com as presentes informações, além de ser um trabalho complexo estimar o centro de gravidade sem o auxílio de um programa computacional. Para o coeficiente de atrito, utilizou-se o valor intermediário da faixa para a relação borracha/asfalto, segundo Mário J. L. Caetano, do site CTBorracha, sendo este valor de 0,65.

Posteriormente, com o resultado de força obtido, calculou-se o torque utilizando o raio do pneu traseiro, sendo este um modelo 23/7R10, o que resulta em um raio externo de aproximadamente 300mm (0,3m). A Figura 32 mostra os cálculos realizados na planilha.

Figura 32 - Força e torque máximo

Força máxima de tração		Torque máximo de tração	
$F_x = \frac{\mu \cdot W_e \cdot b}{L \cdot \left(1 - \frac{h \cdot \mu}{L}\right)}$		$T_x = F_x \cdot r_{pneu}$	
$\mu$	0,65	$F_x$ (N)	1254,5
$W_e$ (N)	2372,06	$r_{pneu}$ (m)	0,2921
$b$ (mm)	835	$T_x$ (Nm)	366,441
$L$ (mm)	1400		
$h$ (mm)	575		
$F_x$ (N)	1254,5		

Fonte: Autor (2022)

Assim, pode-se facilmente calcular a relação de transmissão ideal da caixa, entrando os dados de torque máximo do motor e de redução máxima do CVT. Por fim, calculou-se a redução real, utilizando um fator de correção quanto a eficiência do sistema de transmissão. Foi utilizado o valor de 0,9, referente a 90% de eficiência por ser um valor intermediário a faixa exibida em um trabalho, de Milli et al. (2016) com um sistema semelhante ao proposto. A Figura 33 mostra os cálculos realizados para as reduções.

Figura 33 - Cálculo da relação de transmissão

Redução ideal		Redução real	
$i_{red} = \frac{T_x}{T_m \cdot i_{CVT}}$		$i_{red}$	5,29603
$T_x$ (Nm)	366,441	Fator de correção	0,9
$T_m$ (Nm)	18,65	$i_{real}$	5,88448
$i_{cvt}$	3,71		
$i_{red}$	5,29603		

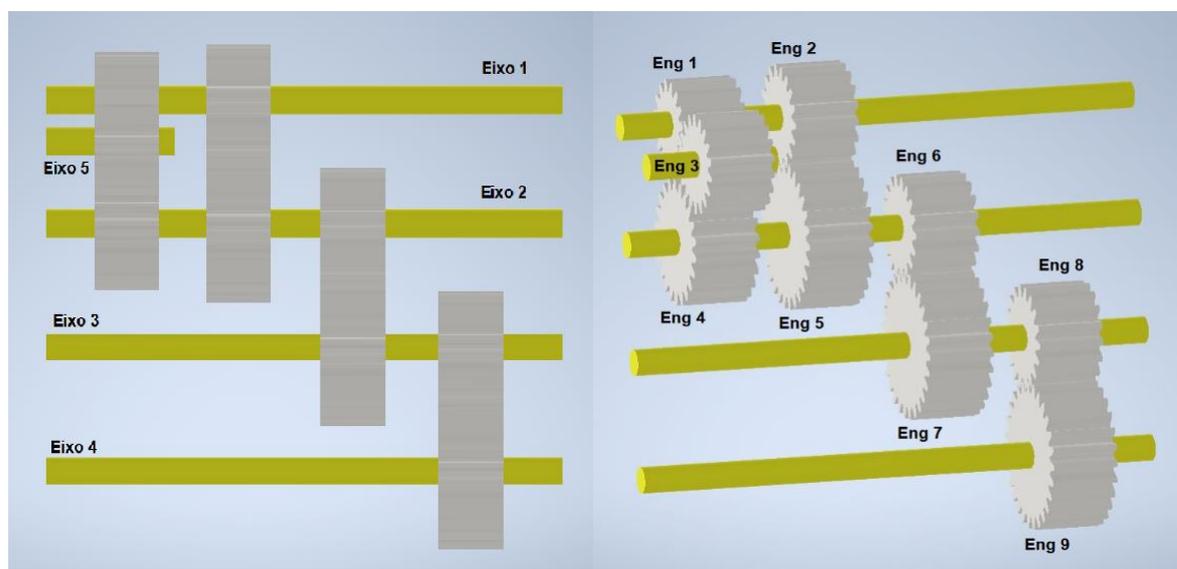
Fonte: Autor (2022)

Assim, chegou-se ao ponto principal deste item, a relação de transmissão real, com o valor de 5,88:1. Portanto, com o fator de correção aplicado, a saída da caixa idealmente entregará mais torque, compensando as perdas durante o sistema.

### 3.4.2 Dimensionamento das engrenagens

Para o dimensionamento das engrenagens buscou-se modelos prontos no mercado para padronizar os outros componentes. Pesquisou-se em catálogos onde primeiramente foi necessário definir o material e o módulo a ser utilizado. Concomitantemente foi realizado um esboço da caixa, mostrado pela Figura 34, para auxiliar no processo de concepção da caixa. Também se utilizou a mesma relação de transmissão de um eixo para o outro.

Figura 34 - Esboço da caixa de redução



Fonte: Autor (2022)

O módulo utilizado foi 2,5mm visando um misto de robustez e tamanho compacto, baseando-se em trabalhos já realizados com módulo menor e largura de engrenagem maior, parâmetro este que foi mantido constante para todas as engrenagens. O aço escolhido foi SAE 1045 por ser um aço com teor de carbono médio, levando a um aumento na resistência e dureza do material. Para garantir que as engrenagens suportem os esforços, calculou-se um fator de segurança entre a tensão AGMA, obtida através da Equação (10), e a tensão do material. A definição ocorreu através de tentativa e erro, onde o objetivo foi obter um fator de segurança de aproximadamente 1,15, o que possibilita uma margem que evite a quebra (falha) e otimize a massa, conforme os requisitos de projeto.

A análise realizada foi apenas estática, visto que a duração da caixa deve ser durante uma competição, e após ela pode ser revisada, o que ocasiona na desconsideração da análise de fadiga.



Figura 37 - Cálculos da tensão AGMA

Par 1 e 3		Par 3 e 4		Par 2 e 5		Par 6 e 7		Par 8 e 9	
Qv	9	Qv	9	Qv	9	Qv	9	Qv	9
B	0,52002	B	0,520020956	B	0,520020956	B	0,52002	B	0,520021
A	76,8788	A	76,87882648	A	76,87882648	A	76,8788	A	76,87883
v (m/s)	13,7603	v (m/s)	14,06613063	v (m/s)	18,34712691	v (m/s)	10,289	v (m/s)	8,583542
Kv	1,31064	Kv	1,313694859	Kv	1,352784503	Kv	1,27274	Kv	1,251294
J	0,25	J	0,3	J	0,25	J	0,33	J	0,39
σ <sub>b</sub> (MPa)	742,895	σ <sub>b</sub> (MPa)	607,0306581	σ <sub>b</sub> (MPa)	575,0857049	σ <sub>b</sub> (MPa)	730,909	σ <sub>b</sub> (MPa)	728,8536
Tensão aço (MPa)	850	Tensão aço (MPa)	850	Tensão aço (MPa)	850	Tensão aço (MPa)	850	Tensão aço (MPa)	850
FS esperado	1,15	FS esperado	1,15	FS esperado	1,15	FS esperado	1,15	FS esperado	1,15
FS calculado	1,14417	FS calculado	1,400	FS calculado	1,478040565	FS calculado	1,16294	FS calculado	1,166215
% de diferença	-0,507%	% de diferença	21,762%	% de diferença	28,525%	% de diferença	1,125%	% de diferença	1,410%

Fonte: Autor (2022)

Com isso, foi utilizado uma tabela contendo o número de dentes e diâmetro primitivo das engrenagens, obtidos através do catálogo de engrenagens de dentes retos da ATI Brasil. A largura das engrenagens é 25mm. A partir destes dados calculou-se a força tangencial dos pares engrenados através da Equação (9). Assim, definindo também os fatores de correção pode-se calcular a tensão AGMA.

O fator dinâmico ( $K_v$ ) foi calculado para cada engrenagem utilizando a velocidade tangencial no ponto, mostrada pela Equação (14), onde já se aplicaram os fatores de conversão, além do número de qualidade, fator também obtido a partir do catálogo, assim como a largura da engrenagem. Outro fator individual para cada engrenagem é o fator geométrico ( $J$ ), retirado da Figura 22, o qual depende do número de dentes da coroa e do pinhão. Os outros fatores são comuns para todas as engrenagens, sendo o fator de sobrecarga considerado 1,5, com choques moderados, conforme a Tabela 3. O fator de distribuição de carga ( $K_m$ ) foi considerado 1,6, segundo a Tabela 4, pois a largura da face da engrenagem é menor que 50mm. Por fim, para os fatores de tamanho ( $K_s$ ) e espessura de borda ( $K_B$ ) foram utilizados valor unitário.

Com o cálculo da tensão AGMA realizada, restou apenas comparar a tensão encontrada com a tensão nominal do material. Conforme Norton (2013), a resistência a tração do aço SAE 1045 laminado a frio é 627MPa. Para aumentar o valor da resistência, será realizado uma têmpera no aço. Norton (2013) traz apenas valores para aços SAE 1040 e 1050 temperados e revenidos a 400°F (200°C), assim utilizou-se um valor intermediário (850MPa) entre os citados pela diferença de carbono.

Feitas todas as definições, os parâmetros de número de dentes, e consequentemente diâmetro primitivo da engrenagem, foram modificados até alcançar o fator de segurança esperado. Os fatores de correção dependentes destes itens também foram modificados durante os cálculos. A Tabela 8 mostra os valores de tensão calculados, além do percentual de diferença

do fator de segurança obtido. Observa-se uma discrepância nos pares 3 – 4 e 2 – 5, onde o primeiro ocorre pela adição de uma engrenagem, modificando a relação de transmissão do par. Já no segundo foi necessário aumentar o número de dentes da engrenagem 2, obtendo-se espaço para a adição da engrenagem 3. Caso contrário, ocorreria interferência nas engrenagens.

Tabela 8 - Esforços calculados

<b>Par engrenado</b>	<b><math>\sigma_b</math> (MPa)</b>	<b>FS calculado</b>	<b>% de diferença</b>
1 - 3	742,895	1,144	-0,507%
3 - 4	607,031	1,400	21,762%
2 - 5	575,086	1,478	28,525%
6 - 7	730,909	1,163	1,125%
8 - 9	728,854	1,166	1,410%

Fonte: Autor (2022)

Assim, ao final do processo de cálculos obteve-se as engrenagens da caixa de redução. A Tabela 9 traz os valores do número de dentes (Z) e diâmetro primitivo (Dp) de cada engrenagem. Como estas engrenagens são prontas, o diâmetro do eixo (D1) é padronizado através do catálogo. Os diâmetros são dados em mm.

Tabela 9 - Engrenagens selecionadas

<b>Engrenagem</b>	<b>Z</b>	<b>Dp (mm)</b>	<b>D1 (mm)</b>
1	15	37,5	10
2	20	50	12
3	23	57,5	14
4	30	75	14
5	40	100	16
6	22	55	14
7	44	110	16
8	36	90	16
9	72	180	20

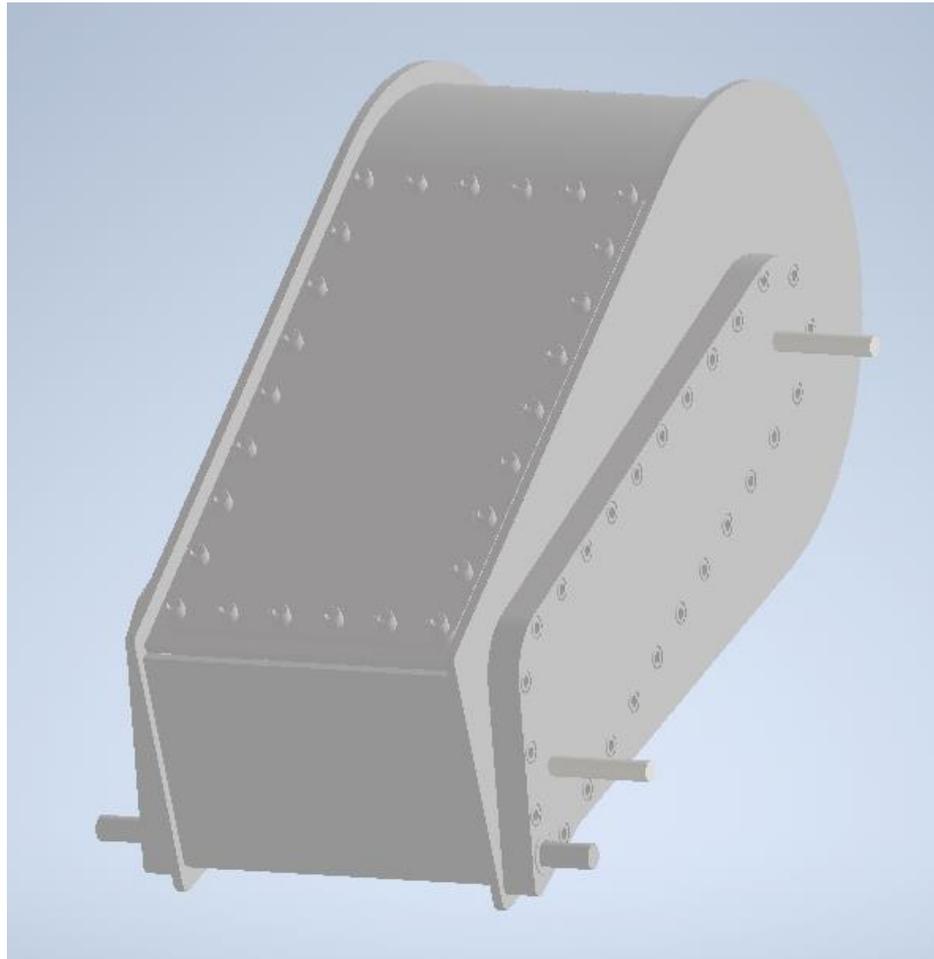
Fonte: Autor (2022)

### 3.4.3 Montagem em CAD da caixa de redução

Com a seleção de engrenagens feitas, iniciou-se a montagem do modelo no *software* Inventor 2020. O esboço prévio foi modificado adicionando os tamanhos corretos de

engrenagem e eixos, o que acarretou a mudança da disposição das engrenagens buscando uma maior compactação do modelo. A Figura 38 mostra a caixa fechada, utilizando duas tampas laterais para fixação dos rolamentos, assim como fechamento da caixa. Para facilitar o acesso, também se utilizou uma tampa na parte superior. Estas são fixadas através de parafusos na carcaça da caixa.

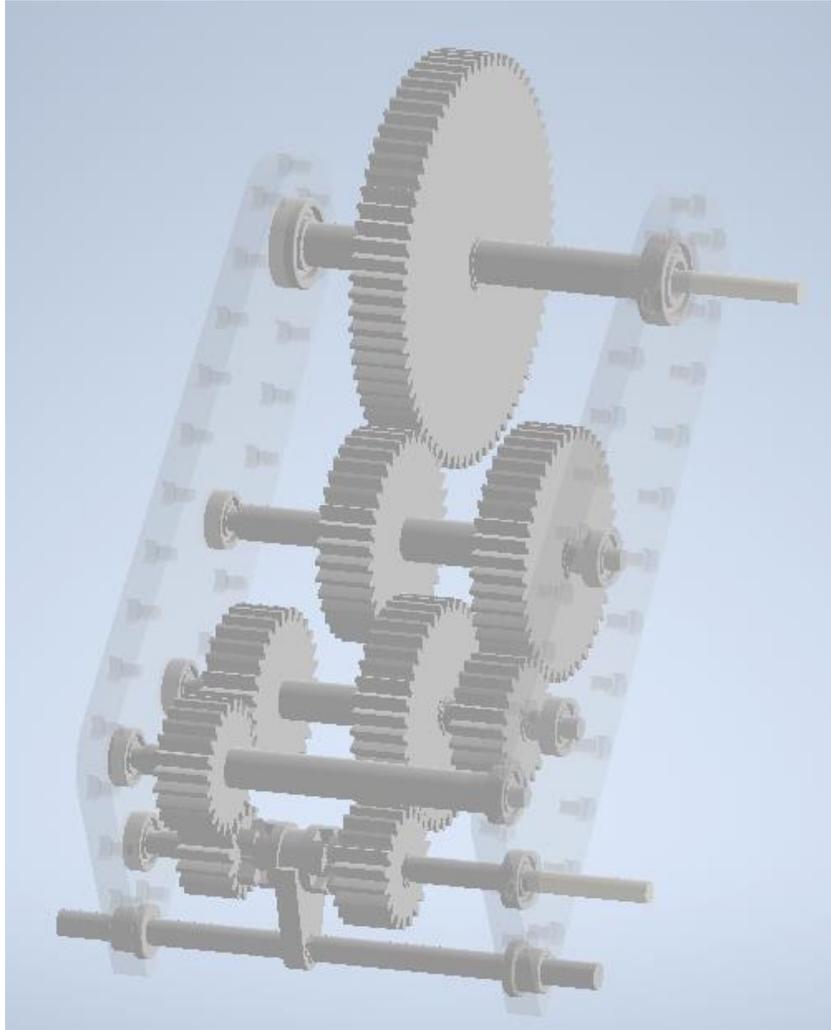
Figura 38 - Caixa de redução



Fonte: Autor (2022)

Já a Figura 39 mostra a disposição dos eixos e engrenagens, assim como os rolamentos acoplados nas tampas laterais (estas com a função de transparência do *software* ativada para melhor visualização).

Figura 39 - Disposição das engrenagens

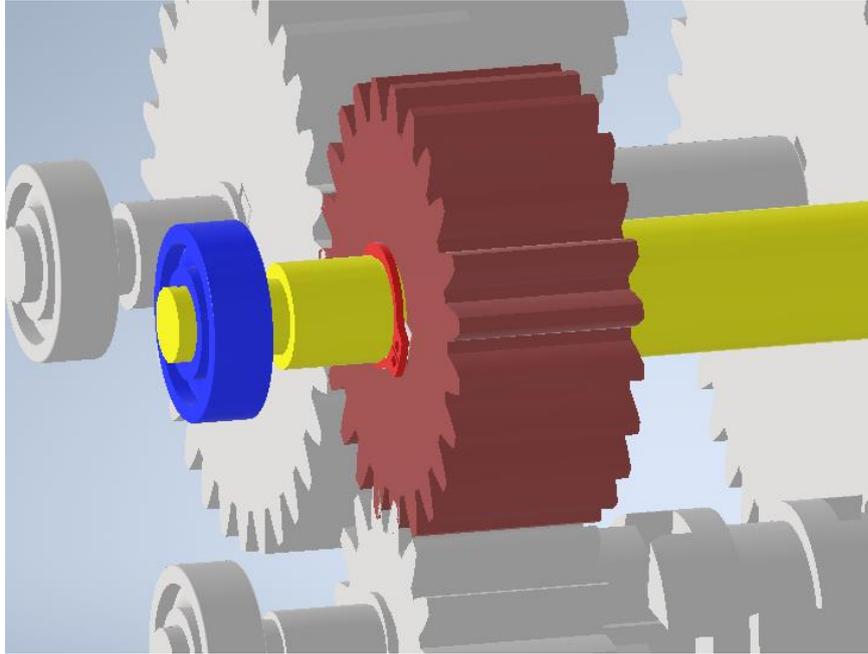


Fonte: Autor (2022)

Os rolamentos foram selecionados a partir de catálogos, conforme o diâmetro dos eixos. Para realizar a fixação das engrenagens utilizou-se anéis elásticos, padronizados pela norma DIN 471 e também chavetas, normatizados pela NBR6441. Além disso, utilizou-se os retentores para realizar a vedação, visto que a lubrificação será realizada por banho em óleo.

A Figura 40 destaca a montagem dos eixos, onde o eixo aparece na cor amarela, a engrenagem em vermelho escura, o anel elástico em vermelho e por fim o rolamento visualizado na cor azul. A engrenagem também é apoiada em um ressalto no eixo no lado contrário.

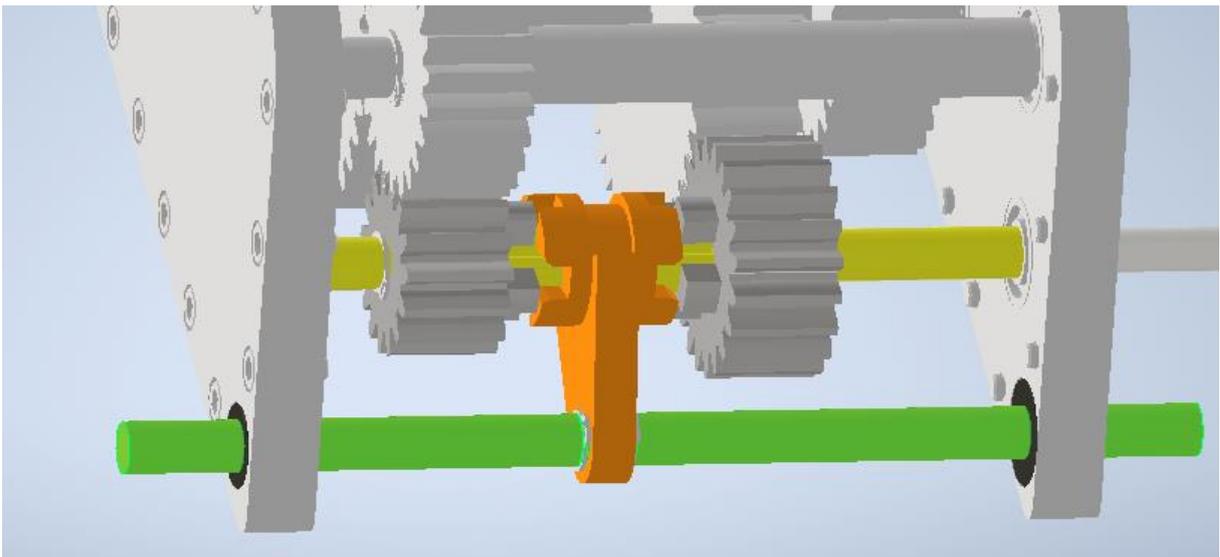
Figura 40 – Montagem no eixo



Fonte: Autor (2022)

Além disso, projetou-se o garfo para seleção de marchas, mostrado pela Figura 41, o qual deverá contar com um mecanismo externo para a seleção. Pode-se utilizar um sistema de espigas, onde o eixo desliza através das buchas de bronze e engrena a marcha desejada. Este deve ser desenvolvido posteriormente com o novo protótipo Ibirubaja consolidado.

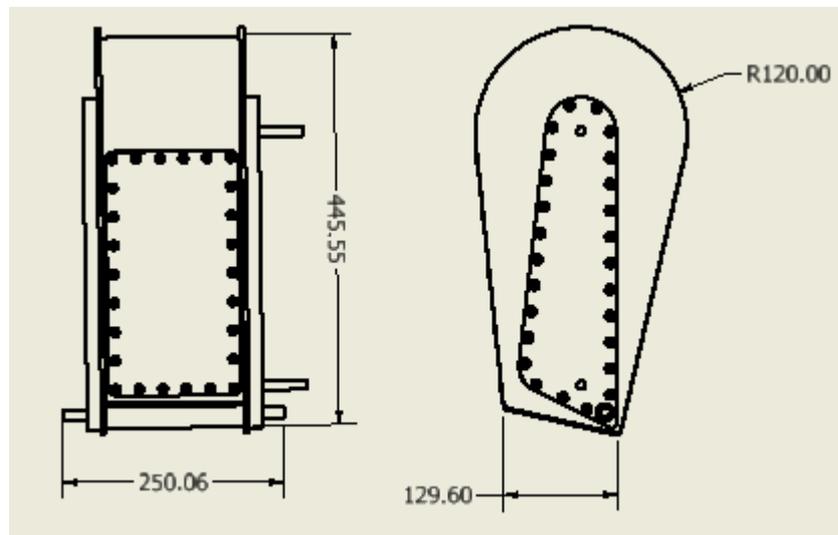
Figura 41 - Alavanca de seleção de marchas



Fonte: Autor (2022)

Por fim, a Figura 42 mostra um desenho técnico parcial com as principais dimensões da caixa.

Figura 42 - Principais dimensões da carcaça



Fonte: Autor (2022)

#### 3.4.4 Custos

Para finalizar o projeto, foi realizada uma análise de custos dos componentes da caixa, buscando o preço de mercado obtido através de sites de anúncio. O valor do câmbio CVT não foi considerado pois, em conversas com a equipe, um dos objetivos é angariar patrocínios com as empresas colaboradoras do projeto para custear este componente. Portanto, o dinheiro não entraria no fluxo de caixa direto, apesar de ser um item do projeto como um todo.

As engrenagens cotadas no próprio site da ATI Brasil chegaram a um valor aproximado de R\$1350,00, além do frete. Considerando ainda a necessidade de realizar tratamento térmico na peça, logo, para a estimativa de custos buscou-se uma estimativa com a empresa Traterm, de São Leopoldo/RS. Seu valor médio é R\$7,00/kg, e considerando um peso de 13,22kg entre engrenagens e eixos, o serviço de tratamento térmico custaria em torno de R\$90,00. Uma alternativa é realizar este processo nos laboratórios do IFRS, porém pode não ser possível garantir que a têmpera seja efetiva.

Para os rolamentos buscou-se os modelos listados na plataforma de varejo do Mercado Livre, a qual possui grande variedade de anunciantes e assim permite a comparação de preços dos itens, escolhendo o de menor custo. O acoplamento elástico foi pesquisado no site LiLo

Redutores, a qual já foi utilizada para adquirir um acoplamento elástico em outro trabalho realizado no campus Ibirubá. Assim, o preço estimado para estes componentes foi de aproximadamente R\$500,00.

Os materiais para fabricação foram considerados por massa, aferindo através do CAD a massa aproximada dos componentes. As peças de aço SAE 1020, utilizados para a carcaça da caixa, totalizaram 22,7kg. A pesquisa de preços foi realizada em site estrangeiro, Alibaba, o custo foi de US\$0,50 por quilograma. Portanto, considerando o preço atual do dólar em março de 2022, estes custos somam em torno de R\$60,00. Ressalta-se que os preços obtidos são para algumas toneladas, o que pode causar um aumento neste valor mediante fornecimento nacional e em pequena quantidade.

Assim, a estimativa final de custos do projeto foi de R\$2000,00, estando dentro do orçamento de R\$3000,00 inicialmente colocado pela equipe Ibirubaja.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A utilização da metodologia de desenvolvimento de produto se mostrou extremamente eficiente, pois o projetista necessita abordar diversas características do produto para montar uma concepção que satisfaça os requisitos demandados pelos consumidores, neste caso a equipe Ibirubaja, além de considerar praticamente todos os pontos do produto. A utilização das ferramentas como a casa da qualidade, a qual direciona o foco aos requisitos que o projeto deve priorizar, a matriz morfológica onde pode-se estabelecer diversas concepções para análise, e pôr fim a análise de sensibilidade, onde avalia-se a melhor concepção.

O trabalho contou com as opiniões da equipe para alguns pontos, como a escolha do CVT e principalmente os requisitos de usuário. Assim, a concepção 1, a qual foi escolhida através da metodologia, atende a maioria das características apontadas, e pensando em manutenção durante a competição, o modelo ficou simples e de fácil manutenção.

Entretanto outras concepções se mostraram com boas características, como a utilização de dois câmbios CVT. Apesar da não utilização da marcha ré, eliminar-se-ia as dúvidas quanto a caixa de redução projetada, com um custo semelhante.

Outro ponto apontado é a utilização de um câmbio CVT de automóvel, o que substituiria todo o conjunto CVT Comet e caixa de redução. Esta pode se mostrar uma boa solução, porém necessita um estudo detalhado, necessitando adaptação para o motor do Baja, o que apenas no desenvolvimento deste TCC não é possível, porém pode ser abordado pela equipe na definição final. Um ponto negativo é não poder regular a pressão nas molas.

Para evitar que a decisão tomada seja tendenciosa, pode-se buscar opiniões de pessoas que não tenham contato com um Baja SAE e possuam conhecimento na área, como um mecânico automotivo, comparando simplesmente as concepções de dois CVTs, CVT e caixa de redução e a utilização do CVT de carro. Assim, elimina-se uma possível avaliação tendenciosa do autor quanto ao atendimento dos pedidos da equipe e utilização de um sistema já consolidado nas competições.

O dimensionamento da relação de transmissão e das engrenagens foi satisfatório, garantindo o torque máximo necessário e que o esforço realizado nas engrenagens não promova a quebra das mesmas. Os eixos foram padronizados conforme o diâmetro das peças catalogadas. Para uma diminuição de massa pode-se construir o diagrama de momento fletor e avaliar o diâmetro em cada seção.

Por fim, o modelo em CAD se mostrou simples, porém funcional. Nota-se que a caixa proposta não possui muitas otimizações pois considerou-se que esta tarefa, assim como o projeto detalhado, não seria abordada no trabalho. Avaliou-se que estes tópicos tornariam o trabalho muito extenso e abrangente, visto que é necessário grande aprofundamento em questões de construção e elementos finitos.

Os custos estimados estão dentro do orçamento, restando uma boa margem para trabalhar em melhorias. Entretanto a concepção modelada ficou extremamente pesada, o que diminui a eficiência do carro. Para isso, o ideal é reduzir o tamanho das engrenagens finais, principalmente o par 8 – 9. Conforme visto na Equação (10), a largura é inversamente proporcional a tensão, ou seja, a alternativa mais eficaz para a diminuição de tamanho é aumentar a largura da engrenagem. Assim, a carcaça poderia ser modificada, diminuindo seu tamanho e resultando em menor massa.

Esta mudança também interfere no requisito de projeto referente as dimensões. Em uma análise através do modelo em CAD do chassi, a concepção proposta pode ser instalada, sendo facilitada ainda mais com as possíveis otimizações.

## 5 CONCLUSÃO

O projeto do sistema de transmissão da equipe Ibirubaja através de uma metodologia de projeto se mostrou eficaz, principalmente para a utilização por pessoas que não possuem vasto conhecimento em projeto de produto, pois forneceu o passo a passo para que fossem considerados diversos requisitos, resultando em um modelo que atendesse os mesmos de forma satisfatória.

A metodologia de cálculos utilizada para o dimensionamento das engrenagens se mostrou eficiente, apesar da utilização de uma forma de tentativa e erro, a planilha montada facilitou a realização dos cálculos, já que seus valores eram mudados instantaneamente conforme a alteração dos parâmetros.

O protótipo modelado em CAD atendeu a maioria dos requisitos de projeto e de usuário, resultando em um modelo robusto e simples, onde considerando sua utilização em um veículo Baja, com provas que exigem bastante esforço dos carros, a caixa de redução é satisfatória para seu uso. Ressalta-se que os requisitos não atingidos, referentes a massa e dimensões podem ser ajustadas com estudos para otimização da concepção.

### 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Visto que não foram abordadas algumas tarefas da fase de projeto preliminar e projeto detalhado, sugeriu-se trabalhos futuros neste contexto. Outro ponto a ser considerado é a reavaliação da concepção, visto que a análise de apenas o autor do trabalho pode ser não ser totalmente imparcial como desejado.

a) Reavaliar a concepção com análises de diferentes integrantes da equipe. Conforme já citado, pode-se também buscar a opinião de um mecânico automotivo que não conheça os sistemas comumente utilizados em protótipos Baja, garantindo uma avaliação não tendenciosa.

b) Validar o cálculo do torque máximo através da norma NBR 10312: Veículos rodoviários automotores leves – Determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação em dinamômetro.

c) Otimizar a caixa de redução para redução de massa como um todo.

d) Estudar diferentes *layouts* da caixa de redução, modificando sua estrutura geral. Pode-se utilizar etapas da metodologia de projeto (matriz morfológica) para detalhar elementos não aprofundados no trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ABECOM. Lubrificação Industrial: Dicas de métodos, ferramentas e tipos de lubrificantes industriais. **Abecom**, 2021. Disponível em: <<https://www.abecom.com.br/lubrificacao-industrial-mecanica/>>. Acesso em: 18 Março 2022.
- BACK, N. et al. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. 1<sup>a</sup>. ed. Barueri: Manole, 2008.
- BRASIL, S. **Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil - Emenda 1**. São Paulo: [s.n.], 2018.
- BRASIL, S. Conheça a SAE Brasil. **SAE Brasil**. Disponível em: <<https://saebrasil.org.br/quem-somos/>>. Acesso em: 17 Março 2022.
- BRESOLIN, J. G. **Avaliação da Eficiência do Sistema de Transmissão Utilizado em Protótipos Baja SAE**. Porto Alegre: [s.n.], 2012.
- BUDYNAS, R. G. **Elementos de máquinas de Shigley**. 10<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- CAETANO, M. J. L. Propriedades Tribológicas. **CTBorracha**. Disponível em: <<https://www.ctborrracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-tribologicas/>>. Acesso em: 19 Março 2022.
- CARPES JR., W. P. **Introdução ao projeto de produtos**. Porto Alegre, RS: Bookman, 2014.
- CUNHA, L. B. D. **Elementos de máquinas**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- GILESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1992.
- HARRIS, W. How CVTs Work. **How Stuff Works**, 2005. Disponível em: <[https://auto.howstuffworks.com/cvt.htm?srch\\_tag=r3goyd4mocjd2grrhmligfg2wpfeqkzj](https://auto.howstuffworks.com/cvt.htm?srch_tag=r3goyd4mocjd2grrhmligfg2wpfeqkzj)>. Acesso em: 17 Março 2022.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- MILLI, G. V.; MESQUITA, V. D. A. **Projeto de Caixa de Transmissão por Engrenagens do Tipo Epicicloidal para Veículo Baja SAE**. Vitória: [s.n.], 2016.
- NICE, K. How Automatic Transmissions Work. **How Stuff Works**, 2000. Disponível em: <[https://auto.howstuffworks.com/automatic-transmission.htm?srch\\_tag=nexbhpobqf7wnlqtjpuwlmrck5aovboc](https://auto.howstuffworks.com/automatic-transmission.htm?srch_tag=nexbhpobqf7wnlqtjpuwlmrck5aovboc)>. Acesso em: 17 Março 2022.

NICE, K. How Torque Converters Work. **How Stuff Works**, 2000. Disponível em: <<https://auto.howstuffworks.com/auto-parts/towing/towing-capacity/information/torque-converter.htm>>. Acesso em: 17 Março 2022.

NICE, K.; BRYANT, C. W.; HALL-GEISLER, K. How Clutches Work. **How Stuff Works**, 2007. Disponível em: <<https://auto.howstuffworks.com/clutch.htm>>. Acesso em: Março 18 2022.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, P. G. C. D. **Simulação Numérica do Comportamento Dinâmico de um Câmbio Continuamente Variável Utilizado em Veículos do Tipo Baja**. Niterói: [s.n.], 2015.

PAHL, G. B. W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. **Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. 6<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

SCHLEDER, G. S. Projeto e construção de equipamento para produção de matéria prima para manufatura aditiva para uso em reconstruções ósseas, Passo Fundo, RS, 2021.

WEIHERMANN, H. W. **Estudo Sobre Aplicação de Transmissão Continuamente Variável para Veículos de Pequeno Porte**. Joinville: [s.n.], 2015.