

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GUSTAVO OLIVEIRA SCHEFFER
THIAGO CATALFO ROCHA

**DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL DO SISTEMA DE
TRANSMISSÃO PARA UM PROTÓTIPO BAJA SAE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

GUSTAVO OLIVEIRA SCHEFFER

THIAGO CATALFO ROCHA

**DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL DO SISTEMA DE
TRANSMISSÃO PARA UM PROTÓTIPO BAJA SAE**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Msc. Antonio Kozlik Junior

CURITIBA

2014

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa “Desenvolvimento conceitual do sistema de transmissão para um protótipo Baja SAE”, realizada pelos alunos Gustavo Oliveira Scheffer e Thiago Catalfo Rocha, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Msc. Antonio Kozlik Junior
UTFPR - DAMEC

Curitiba, 20 de Janeiro de 2014.

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “Desenvolvimento conceitual do sistema de transmissão para um protótipo Baja SAE”, realizada pelos alunos Gustavo Oliveira Scheffer e Thiago Catalfo Rocha, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Alfredo Vrubel
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. Jorge Luiz Erthal
DEMEC, UFPR
Avaliador

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 20 de Janeiro de 2014.

DEDICATÓRIA

À equipe Imperador UTFPR de Baja e Formula SAE, parceira durante toda a nossa vida universitária e escola da vida nos dias e, principalmente, nas madrugadas.

AGRADECIMENTOS

Aos nossos pais, que seguimos como exemplo.

À Equipe Imperador UTFPR de Baja e Formula SAE, pela oportunidade de desenvolver este trabalho e pelo apoio logístico, financeiro e motivacional.

À todas as pessoas (que não precisam ter seus nomes citados pois sabem de nossa gratidão) que nos auxiliaram durante essa jornada e entenderam nossa ausência quando necessário.

E a você, leitor, por se interessar pelo nosso trabalho. Sem sua atitude, estes seriam apenas papéis empilhados. Graças à sua leitura isto agora é muito mais do que uma etapa para cumprir com as exigências do nosso curso.

O tempo é um executor implacável, mas dissimulado. Quando mais precisamos dele, ele nos falta em demasia. Quando dele não precisamos, ele abunda sobremaneira. Contudo, em quaisquer dos casos, nos cobra inexoravelmente de forma impiedosa.

(Carlos Magno Corrêa Dias)

RESUMO

O propósito deste trabalho consistiu no desenvolvimento de um sistema de transmissão para o protótipo Baja SAE da Equipe UTFPR.

O Baja é um veículo *off-road* projetado e fabricado por estudantes de diversas universidades do Brasil e do exterior com o intuito de participar de competições organizadas pela Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade. O motivador para o desenvolvimento deste projeto consistiu no paradoxo existente entre a evolução constante dos resultados da equipe Imperador UTFPR nas competições, principalmente nas provas dinâmicas, e os constantes problemas relacionados ao sistema atual de transmissão (correntes de rolos expostas).

Em um primeiro momento realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre os diferentes tipos de transmissão para se conhecer efetivamente as vantagens e desvantagens de cada sistema. Feito isso, através do método geral de soluções de projeto proposto por Pahl & Beitz diversas combinações de produtos foram avaliadas para, finalmente, optar-se pelo sistema mais adequado às necessidades da equipe.

Como resultado, apresentou-se o modelo de um sistema de redução por corrente de rolos, como já utilizado anteriormente, mas em dois estágios e vedado em uma caixa de redução, cujas principais vantagens são sua massa reduzida, facilidade e baixo custo de fabricação e grande distância entre o sistema de transmissão e o solo, permitindo ao veículo transpor os obstáculos presentes nas competições, aumentando a confiabilidade do veículo da Equipe Imperador UTFPR e permitindo melhores resultados nas próximas competições.

Palavras-chave: Transmissão, Caixa de Redução, Baja, Produto, Projeto.

ABSTRACT

This study had the purpose to develop a drivetrain system to the Baja SAE prototype of the UTFPR team.

Baja is an off-road vehicle designed and manufactured by students from several universities in Brazil and abroad, with the intent to participate the Society of Automotives Engineers competitions. The motivation to this project was the contradiction between the constant evolution of the UTFPR team in competitions, mainly in the dynamics events, and the constant problems related with the current drivetrain system (exposed roller chain).

At first a bibliography review about the different transmissions systems was made, so that the characteristics of each system were known in-depth. After that the method proposed by Pahl & Beitz was used, with which several products combinations were conceived and evaluated, finally, the more appropriate solution was chosen to continue with designing.

As result of the above step the two stage enclosed roller chain system was achieved. The final product has reduced mass, easy and low cost manufacturing, total insulation from debris, adequate lubrication and a greater distance between the system and the ground. These characteristics allow the vehicle to overpass obstacles encountered in the competition and increase its reliability.

Key words: Drivetrain, Gearbox, Baja, Product, Design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema atualmente utilizado pela Equipe Imperador UTFPR.	15
Figura 2 – Condição da pista durante a competição Baja SAE Regional Sul 2011... 16	16
Figura 3 – Fratura dos dentes do pinhão – Baja SAE Brasil 2011.	16
Figura 4 – Gráfico da frequência de falhas no sistema de transmissão dos protótipos da Equipe Imperador UTFPR entre 2009 e 2012.....	17
Figura 5 – Correia exercendo pressão sobre a polia, favorecendo a força de atrito durante a movimentação do sistema.....	23
Figura 6 – Exemplo de correia sincronizadora e sistema de polias.....	24
Figura 7 – Classificação das posições de montagem de rodas dentadas para corrente de rolos.	29
Figura 8 – Renderização do sistema utilizado pela equipe da FEI em 2013.....	33
Figura 9 – Renderização do sistema utilizado pela equipe da EESC USP no ano de 2013.	34
Figura 10 – Renderização do sistema utilizado pela UFPE no ano de 2013.....	35
Figura 11 – Renderização do redutor utilizado pela equipe UFSC Puma em 2013. .	35
Figura 12 – Fotografia do sistema de redução aberto utilizado pela equipe UFPBaja em 2013.	36
Figura 14 – Desmembramento da função global.....	46
Figura 15 – Representação do acoplamento do eixo ao CVT.....	47
Figura 16 – Modelo de homocinética utilizado como padrão de acoplamento estriado a ser utilizado.	47
Figura 17 – Matriz morfológica do sistema a ser desenvolvido.	49
Figura 18 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 1.....	51
Figura 19 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 2.....	53
Figura 20 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 3.....	54

Figura 21 – Vista explodida e modelagem esboço para a alternativa 4.	55
Figura 22 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 5.....	57
Figura 23 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 6.....	59
Figura 24 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 7.....	59
Figura 25 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 8.....	61
Figura 26 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 9.....	62
Figura 27 – Disposição dos eixos e engrenagens no produto final.	64
Figura 28 – Vista isométrica da proteção lateral em CAD.	66
Figura 29 – Vista isométrica da proteção tangencial em CAD.	67
Figura 30 – Vista explodida do mancal feito a partir de chapas de alumínio.....	68
Figura 31 – Caixa de mancal utilizada anteriormente pela equipe Imperador UTFPR.	68
Figura 32 – Modelagem da caixa com sistema para fixação no veículo.	69
Figura 33 – Vista explodida da montagem da caixa de transmissão.....	70
Figura 34 – Modelagem da caixa de transmissão montada no chassis da equipe....	70
Figura 35 – Fratura dos dentes do pinhão - Baja SAE Brasil 2011.	73
Figura 36 – Corrente rompida - Testes para Baja SAE Brasil 2012.	74
Figura 37 – Falha nos dentes da coroa - Testes para Baja SAE Brasil 2012.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Posição e intensidade das falhas de equipes na Competição Baja SAE Brasil 2011 e 2012.	18
Tabela 2 – Definição do lubrificante para corrente de rolos em função do passo e da temperatura de trabalho.	27
Tabela 3 – Fluxo de lubrificante recomendado para correntes de rolos em relação a potencia transmitida.	27
Tabela 4 – Classificação dos requisitos conforme método QFD.	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro de classificação dos tipos de engrenagens.	21
Quadro 2 – Cálculo do rendimento num sistema de transmissão por correntes.	26
Quadro 3 – Resumo dos resultados encontrados durante etapa de <i>benchmarking</i> . ..	37
Quadro 4 – Requisitos do produto a ser desenvolvido.	41
Quadro 5 – Especificações do produto.	43
Quadro 6 – Combinação das alternativas que serão avaliadas.	50
Quadro 7 – Resultado da Matriz de Avaliação Mista.	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contexto do tema	14
1.2	Objetivo	17
1.3	Justificativa	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS	20
2.2	Sistemas de transmissão	20
2.2.1	Transmissão por engrenagens	21
2.2.1.1	Engrenamentos cilíndricos externos	21
2.2.1.2	Engrenagens internas	22
2.2.2	Transmissão por Correias	22
2.2.2.1	Correias planas	23
2.2.2.2	Correias trapezoidais	23
2.2.2.3	Correias sincronizadoras	24
2.2.3	Transmissão por corrente de rolos	24
3	METODOLOGIA	30
3.1	Descrição da Metodologia	30
3.2	Produtos do Projeto	31
4	<i>BENCHMARKING</i>	32
4.2	Equipe EESC USP	33
4.3	Equipe Mangue Baja (UFPE)	34
4.4	Equipe UFSC de Baja SAE	35
4.5	Equipe UFPBaja (UFPB)	36
5	LEVANTAMENTO DAS NECESSIDADES DA EQUIPE	38
5.1	Descrição do instrumento de coleta de informações	38
5.2	Descrição da aplicação do instrumento de coleta de informações	38
6	PROJETO CONCEITUAL	40
6.1	Introdução	40
6.2	Definição da tarefa	40
6.3	Requisitos de qualidade	40
6.4	Casa da qualidade	41
6.5	Especificação do produto	43
7	DESENVOLVIMENTO DE ALTERNATIVAS	45
7.1	Função Global	45
7.2	Estrutura Funcional	45
7.3	Geração de Alternativas	46
7.4	Avaliação de alternativas	50
7.5	Detalhamento das alternativas	51
7.5.1	Alternativa 1	51
7.5.1.1	Descrição do funcionamento	51
7.5.1.2	Avaliação	51

7.5.2	Alternativa 2	52
7.5.2.1	Descrição do funcionamento	52
7.5.2.2	Avaliação	53
7.5.3	Alternativa 3	54
7.5.3.1	Descrição do funcionamento	54
7.5.3.2	Avaliação	54
7.5.4	Alternativa 4	55
7.5.4.1	Descrição do funcionamento	55
7.5.4.2	Avaliação	56
7.5.5	Alternativa 5	56
7.5.5.1	Descrição do funcionamento	56
7.5.5.2	Avaliação	57
7.5.6	Alternativa 6	58
7.5.6.1	Descrição do funcionamento	58
7.5.6.2	Avaliação	58
7.5.7	Alternativa 7	59
7.5.7.1	Descrição do funcionamento	59
7.5.7.2	Avaliação	60
7.5.8	Alternativa 8	60
7.5.8.1	Descrição do funcionamento	60
7.5.8.2	Avaliação	61
7.5.9	Alternativa 9	62
7.5.9.1	Descrição do funcionamento	62
7.5.9.2	Avaliação	62
7.6	Seleção da solução	63
8	DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO E <i>LAYOUT</i>	64
8.1	Desenvolvimento da solução	65
8.1.1	Eixos	65
8.1.2	Proteções Laterais	65
8.1.3	Proteção tangencial	66
8.1.4	Mancais	67
8.1.5	Rolamentos, corrente e coroa	69
8.1.6	Montagem	69
9	CONCLUSÃO	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO DO TEMA

A SAE promove vários projetos educacionais para desenvolver e aprimorar os conhecimentos na área automobilística para alunos ligados à engenharia da mobilidade. Entre esses projetos está o Baja, cujo principal objetivo é complementar a formação destes futuros profissionais do setor automobilístico, fazendo-os vivenciar, ainda no período em que estão na Universidade, grandes desafios e desenvolver o espírito de equipe e trabalho em grupo. Desta forma, a SAE organiza anualmente dois eventos chamados “Baja SAE”, momentos em que reúnem alunos de diversas universidades brasileiras para competir com seus protótipos Baja. Estes veículos, para estarem aptos para a competição, devem seguir diversas normas exigidas pela SAE (SAE BRASIL, Capítulo 7, 2013) principalmente em relação à segurança do veículo.

A equipe Imperador UTFPR participa regularmente das competições denominadas Baja SAE desde novembro de 2009 tendo, até início do desenvolvimento deste trabalho, obtido seus melhores resultados na competição Baja SAE Regional Sul 2012, etapa em que se sagrou oitava colocada geral, além de ter obtido a primeira colocação em velocidade final e pesagem, segundo lugar em aceleração e o terceiro-lugar na prova de apresentação de projeto. Entretanto, seguidamente a equipe Imperador UTFPR tem tido problemas relacionados ao seu sistema de transmissão, impossibilitando resultados ainda melhores.

Formada por alunos de diversos cursos da UTFPR, o projeto se destaca no meio acadêmico devido à sua grande área de atuação, pela multidisciplinaridade de suas atividades e pelo reconhecimento dado pelas empresas aos alunos participantes deste projeto. A equipe é formada por cerca de 30 alunos da instituição, dos cursos de Engenharia Mecânica, Elétrica, Eletrônica e Automação além de Bacharelado em Design e Administração. Estes alunos trabalham em conjunto para, duas vezes por ano, participar das competições organizadas pela SAE.

Desde 2009, na primeira participação da equipe em competições, decidiu-se por utilizar um sistema de transmissão por CVT (*Continuously Variable*

Transmission) acoplado ao sistema de relação de transmissão fixa por correntes de rolos.

O câmbio CVT possui grande aceitação entre as equipes participantes da competição Baja SAE. Na competição Baja SAE 2012 mais de 70 equipes participantes optaram por utilizar este tipo de sistema, sempre acoplado a outro amplificador de torque, este com maior diversidade de opções, como trem de engrenagens, caixas de redução com troca de marchas e transmissões flexíveis por correntes de rolos.

A equipe Imperador UTFPR sempre optou pelo sistema de transmissão por corrente de rolos, apresentado na Figura 1, principalmente pela simplicidade e facilidade de aquisição dos componentes.



Figura 1 – Sistema atualmente utilizado pela Equipe Imperador UTFPR.

FONTE: Autoria própria*

Todavia, o sistema mantém-se exposto durante a competição e, por se tratar de um ambiente bastante agressivo, como se pode notar na Figura 2, este sistema torna-se suscetível a situações e carregamentos não avaliados durante o projeto.

* Todas as figuras, tabelas e quadros a seguir que não apresentarem fonte, são de autoria própria.



Figura 2 – Condição da pista durante a competição Baja SAE Regional Sul 2011.

Como exemplo de sobrecargas, foram citadas pela equipe Imperador diversas ocorrências no passar dos anos, como travamento da corrente por excesso de sujeira, lubrificação deficiente e, em casos limites de contatos com pedras ou outros fragmentos da pista com o sistema de transmissão. Houve a ruína de diversos componentes, como ocorreu durante a etapa de 2011 da competição Baja SAE Brasil, em que o sistema esteve sobrecarregado e houve a fratura dos dentes do pinhão, como nota-se na Figura 3. Este caso ampliado, além de outras situações, podem ser verificadas no Apêndice A.



Figura 3 – Fratura dos dentes do pinhão – Baja SAE Brasil 2011.

1.2 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho consiste em desenvolver o projeto conceitual e o modelo de um sistema de redução para utilização em veículos tipo Baja.

1.3 JUSTIFICATIVA

Nas últimas competições que a Equipe Imperador UTFPR participou, o sistema de redução fixa utilizado pela equipe apresentou falhas com frequência. A partir desta informação percebeu-se que existe uma oportunidade de melhoria de projeto, tendo em vista que estes problemas estão diretamente ligados à impossibilidade da equipe de atingir as primeiras colocações nas competições. Conforme percebe-se na Figura 4, a equipe da UTFPR passou por diferentes dificuldades nas competições com problemas relacionados à transmissão e o principal motivador deste trabalho envolve o desejo de corrigir esta deficiência.

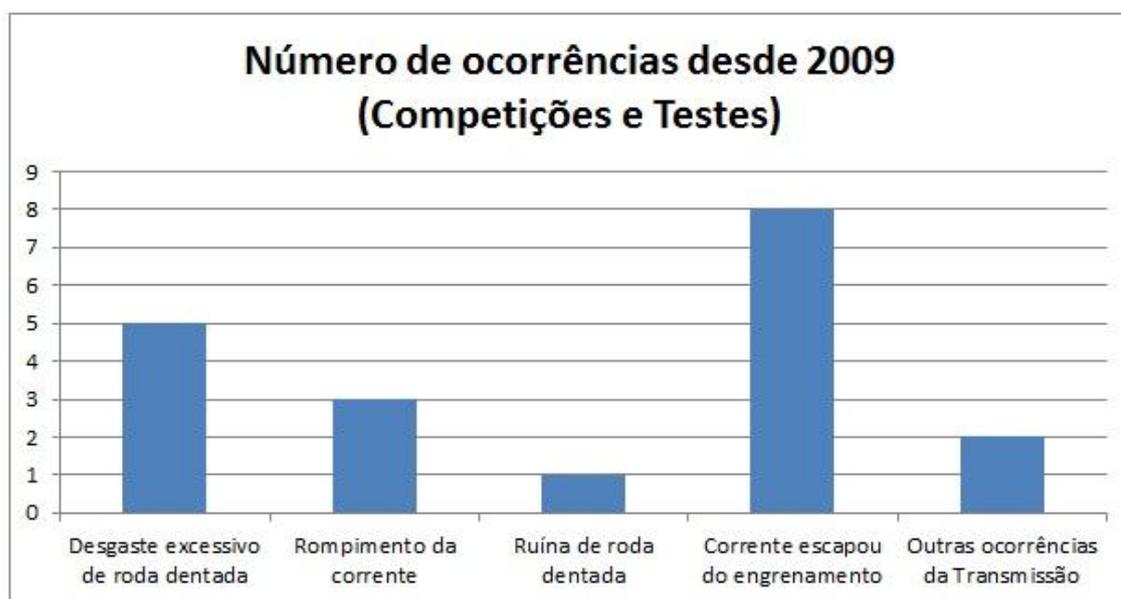


Figura 4 – Gráfico da frequência de falhas no sistema de transmissão dos protótipos da Equipe Imperador UTFPR entre 2009 e 2012.

A principal prova da competição Baja SAE Brasil, o Enduro de Resistência, consiste em uma corrida com quatro horas de duração em terrenos acidentados. Neste momento os carros necessitam superar diversos obstáculos, como rampas, troncos e pedregulhos e, invariavelmente, carros de diversas equipes acabam

quebrando durante esta etapa. É possível confirmar, através da Tabela 1, a relação direta que há entre a pontuação das equipes nesta etapa e a regularidade/ausência de paradas para consertos. Assim, confirma-se a importância de se desenvolver um projeto de transmissão robusta e durável, capaz de superar os desafios impostos durante esta prova.

Tabela 1 – Posição e intensidade das falhas de equipes na Competição Baja SAE Brasil 2011 e 2012.

Equipe	2011		2012	
	Falhas / Consertou?	Pontuação no Enduro	Falhas / Consertou?	Pontuação no Enduro
FEI Baja 1	0	372,88	2 - Não	189,47
FEI Baja 2	0	400	1 - Não	126,32
Mangue Baja 1	2 - Sim	40,68	0	400
Mangue Baja 2	0	372,88	1 - Sim	329,82
Imperador UTFPR	1 - Não	0	2 - Não	133,33
UFPBaja Inexorável	0	305,08	1 - Não	70,18
EESC-USP 1	0	379,66	0	392,98
EESC-USP 2	1 - Sim	291,53	1 - Não	154,39

FONTE: SAE Brasil, 2012

Durante sua participação na equipe, os autores do presente trabalho perceberam a possibilidade de, com este projeto, aumentar a competitividade da Equipe Imperador UTFPR nas próximas competições e, motivados pelo professor orientador da equipe e também deste trabalho, decidiram pela execução deste projeto.

Assim, será desenvolvido o projeto conceitual de um sistema de transmissão adequado ao veículo utilizando a metodologia proposta por Pahl & Beitz (1996). O desenvolvimento do trabalho será focado na etapa inicial, da seleção da solução a ser escolhida de acordo com os requisitos almejados pela equipe. Posteriormente,

em trabalhos futuros, deve-se atuar nas próximas etapas, o projeto preliminar e detalhado da alternativa selecionada neste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

A metodologia de projeto utilizada neste trabalho é baseada no método geral de soluções de projeto (PAHL; BEITZ, Capítulo 2, 2007). Será feito um breve apontamento sobre as etapas da etapa de projeto conceitual, que será o foco deste trabalho.

Neste método são prescritas diversas etapas para facilitar o desenvolvimento de um produto, quais sejam:

1. Deve-se definir uma meta geral para o produto e, a partir deste dado, descrever metas específicas para cada subconjunto, favorecendo a motivação para cumprimento da tarefa;

2. Definir o problema, avaliando as condições e características do produto a ser desenvolvido;

3. Não julgar as ideias de forma precipitada. Não se deve descartar uma opção antes de garantir que esta não pode ser a solução do problema;

4. Buscar diversas possibilidades dentro das soluções encontradas. Combinar o máximo possível de soluções de projeto para posteriormente selecionar a melhor combinação que gerará a alternativa ideal para o desenvolvimento do produto;

5. Avaliar se a escolha definida está de acordo com as restrições do projeto, metas definidas e características gerais previamente detalhadas;

6. Projetar o produto a partir da alternativa escolhida como ideal.

Optou-se, assim, por utilizar a metodologia proposta pelos autores, seguindo os passos citados anteriormente, mas criando etapas de avaliação entre os tópicos listados para garantir o cumprimento dos objetivos do trabalho.

2.2 SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

Sistemas para transmissão de torque e potência são utilizados nas mais diversas aplicações e podem de maneira geral, ser classificadas em mecânicas, hidráulicas e elétricas. Neste trabalho serão consideradas apenas as transmissões

mecânicas, pois se tratam, em geral, de sistemas mais simples, leves e de menor custo do que os outros (NIEMANN, 1971). A seguir serão discutidas algumas das diversas soluções existentes para transmissões mecânicas.

2.2.1 TRANSMISSÃO POR ENGRENAGENS

Engrenagem é o conjunto formado por duas rodas dentadas sendo que uma é utilizada para movimentar a outra. Roda dentada é uma forma geométrica com dentes distribuídos uniformemente em seu perímetro (DUDLEY, 1984). É o tipo mais comum utilizado, servindo para uma enorme gama de potências, rotações e relações de multiplicação. Algumas de suas características importantes são: relação de transmissão constante e independente do carregamento, resistência à sobrecargas, dimensões reduzidas, pequena necessidade de manutenção e alto rendimento mecânico. Apresentam como contrapartida um custo maior e, por se tratar de um sistema relativamente rígido, têm baixa absorção de impactos durante seu funcionamento (NIEMANN, 1971). Dudley (1984) sugeriu uma classificação para os tipos mais usados de engrenagens conforme o Quadro 1.

Eixos paralelos	Eixos cruzados	Eixos reversos
Dentes Retos Externa	Cônicas	Helicoidais cruzadas
Dentes Retos Interna	Cônicas espirais	Parafuso sem-fim
Helicoidal Externa		Hipoidal
Helicoidal Interna		

Quadro 1 – Quadro de classificação dos tipos de engrenagens.

FONTE: Dudley, 1984

2.2.1.1 ENGRENAMENTOS CILÍNDRICOS EXTERNOS

O engrenamento externo é a aplicação mais comum de engrenamento, sendo utilizado em redutores comerciais, automóveis, brinquedos, eletrodomésticos, máquinas de usinagem, etc (DUDLEY, 1984). Feito normalmente com dentes de perfil evolvental, distinguem-se em engrenagens de dentes retos, quando seus

dentes são paralelos ao seu eixo de rotação e helicoidais, quando seus dentes são inclinados em relação ao seu eixo de rotação, formando uma hélice.

As engrenagens de dentes retos possuem a vantagem de poderem ser fabricadas com métodos relativamente simples, apresentando menor custo em comparação às helicoidais. As de dentes helicoidais, entretanto, possuem a vantagem de serem, em geral, mais resistentes, o que torna sistemas deste tipo mais compactos. Possuem também um funcionamento mais silencioso e com menos vibrações, fator decisivo de sua enorme utilização em transmissões de automóveis (NORTON, 2004).

As duas configurações (dentes retos e helicoidais) apresentam elevados rendimentos mecânicos da ordem de 96% a 99% (NIEMANN, 1971).

2.2.1.2 ENGRENAGENS INTERNAS

Uma engrenagem interna é sempre utilizada em conjunto com outra externa. Podendo também possuir dentes helicoidais ou retos. São utilizadas em redutores planetários, que possuem a característica de apresentar grandes relações de transmissão de maneira compacta, mantendo alta eficiência mecânica (96% a 98%) e tendo a característica dos eixos de entrada e saída serem concêntricos (SHIGLEY, 1984). Outra aplicação das engrenagens internas é a utilização como um redutor comum, porém com distância entre centros reduzida (DUDLEY, 1984).

2.2.2 TRANSMISSÃO POR CORREIAS

As correias são elementos flexíveis, geralmente fabricadas de um material compósito de polímeros com fibras vegetais ou materiais metálicos, como cabos de aço (DE MARCO, 2009). As principais vantagens deste sistema estão relacionadas à simplicidade de construção, baixos níveis de ruído e capacidade de absorção de impactos elasticamente (NIEMANN, 1971). Segundo De Marco (2009), pode-se dividir as correias em três tipos, apresentados a seguir.

2.2.2.1 CORREIAS PLANAS

As correias planas são aplicadas principalmente quando se possui grandes distâncias entre centros. É o tipo mais simples de correias existente e possuem como vantagem a possibilidade de se utilizar o escorregamento da correia como um sistema semelhante ao de uma embreagem quando a polia motora rotaciona mas a correia não transmite o torque à polia movida (SHIGLEY, 1984). Entretanto, possuem como desvantagem a variação na relação de transmissão devido ao escorregamento, e à resistência inferior a de outros tipos para uma mesma espessura, além do limite de relação de transmissão de 1:5 (NIEMANN, 1971).

2.2.2.2 CORREIAS TRAPEZOIDAIS

Estas correias, mostradas na Figura 5, possuem perfis definidos para aquisição, seguindo a nomenclatura apresentada em catálogos comerciais. Sua principal vantagem está relacionada à possibilidade de se utilizar este tipo de sistema de transmissão em distâncias entre centros menores e pela diminuição do escorregamento em relação à polia, pois o movimento do sistema de transmissão força a introdução da correia na ranhura existente na polia, aumentando a força de atrito entre a correia e a polia em comparação às correias planas (SHIGLEY, 1984).

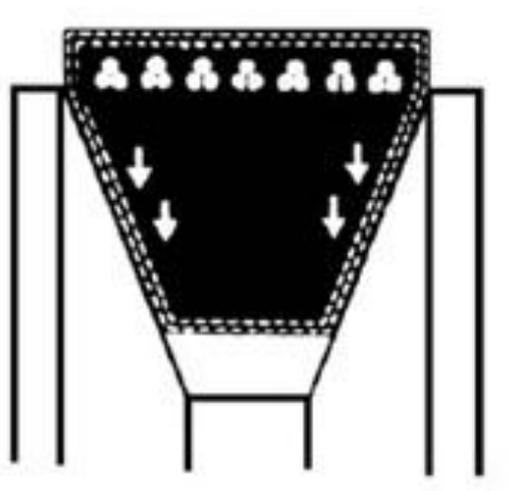


Figura 5 – Correia exercendo pressão sobre a polia, favorecendo a força de atrito durante a movimentação do sistema.

FONTE: De Marco, 2009

2.2.2.3 CORREIAS SINCRONIZADORAS

As correias sincronizadoras são os modelos mais recentes de correias. Seu desenvolvimento surgiu da necessidade de se obter um sistema leve, que absorva impactos e vibrações além de garantir uma relação de transmissão constante, ou seja, sem escorregamentos entre a polia e a correia (ATI, 2012). Estas correias se distinguem dos outros tipos pelo fato de possuírem dentes que, em contato com canais existentes nas polias, permitem a movimentação do sistema, como percebe-se na Figura 6.



Figura 6 – Exemplo de correia sincronizadora e sistema de polias.

FONTE: ATI, 2012

As principais vantagens deste sistema (SHIGLEY, 1984) são:

- Transmissão de potência com velocidade angular constante;
- Não é necessário tensionar a correia previamente contra a polia;
- Pode-se utilizar este sistema para diversas velocidades;

As desvantagens do sistema em comparação às correias comuns devem-se ao custo mais alto e pela fabricação da polia ser de maior complexidade.

2.2.3 TRANSMISSÃO POR CORRENTE DE ROLOS

Transmissões por correntes são compostas por rodas dentadas movidas e motoras e uma corrente de rolos. As rodas dentadas para este tipo de transmissão é

usada para mover a movida de maneira indireta, através da corrente. Podem ser encontrados sistemas que utilizam correntes de rolos com mais de uma fileira, com o objetivo de se obter maiores capacidades de carga com um mesmo passo de corrente, mantendo o sistema compacto.

Segundo De Marco(2009), as principais características deste sistema são:

- Adequada para grandes distâncias entre eixos (tornando impraticável a utilização de engrenagens);
- Transmissão de maior potência (quando comparada com correias)
- Permite a variação do comprimento, com a remoção ou adição de elos;
- Menor carga nos mancais, já que não necessita de uma carga inicial;
- Não há perigo de deslizamento;
- Bons rendimentos e eficiência (98 a 99 %, em condições ideais);
- Longa vida útil;
- Permite grandes reduções ($i < 7$);
- São mais tolerantes em relação ao desalinhamento de centros;
- Transmissão sincronizada;

Em geral, o material utilizado na fabricação de correntes deve possuir alta resistência mecânica, são tratados termicamente e ter excelente resistência aos esforços de fadiga, baixa sensibilidade ao impacto e excelente resistência ao desgaste. Sendo assim, geralmente são fabricadas em aços especiais (aço cromo-níquel) e passam por processos de tratamento térmico como têmpera e revenimento. Em casos especiais, como em aplicações na indústria alimentícia, por exemplo, podem ser fabricadas em aço inox.

Conforme dito anteriormente, a eficiência deste sistema de transmissão atinge valores entre 98 e 99%, desde que em suas condições ideais. Para tanto, Dobrovolsky (1965) definiu um equacionamento para o cálculo de uma transmissão por correntes específica, conforme o Quadro 2 abaixo:

Cálculo das perdas por atrito		Cálculo do rendimento do sistema	
$\eta = \frac{P}{P + D}$		$\delta = 4.902, \mu \cdot \frac{D_{rol}}{D_{pin}}$	
Onde:			
η	Rendimento do sistema		
P	Potência transmitida, em kW		
δ	Perdas por atrito das articulações, em kW		
D_{rol}	Diâmetro do rolete, em mm		
D_{pin}	Diâmetro do pinhão, em mm		
μ	Coeficiente de atrito		

Quadro 2 – Cálculo do rendimento num sistema de transmissão por correntes.

FONTE: DOBROVOLSKY(1965).

O rendimento e performance estão diretamente relacionados à lubrificação adequada do sistema de transmissão. O óleo lubrificante reduz o atrito entre os componentes além de auxiliar na refrigeração do sistema.

Desta forma, não se recomendam óleos muito viscosos por estes não conseguirem penetrar nas folgas dos componentes mas, também, óleos com viscosidade muito baixa escoam, não mantendo a camada lubrificante adequada. Há também grande interferência da temperatura de trabalho na seleção do óleo adequado. Sendo assim, sugere-se a aplicação da Tabela 2 abaixo, segundo Norton(2004).

Tabela 2 – Definição do lubrificante para corrente de rolos em função do passo e da temperatura de trabalho.

Passo	Temperatura			
	10°C a 0°C	0°C a 40°C	40°C a 50°C	50°C a 60°C
1/2" a 5/8"	SAE 10W	SAE 20	SAE 30	SAE 40
3/4" a 1"	SAE 20	SAE 30	SAE 40	SAE 50
1.1/4"				
1.1/2" a 3"	SAE 30	SAE 40	SAE 50	

FONTE: DOBROVOLSKY(1965).

Ainda, como o óleo se movimenta em conjunto com a corrente, De Marco(2009) recomenda alterar o fluxo de óleo em função da potência transmitida, segundo a Tabela 3.

Tabela 3 – Fluxo de lubrificante recomendado para correntes de rolos em relação a potência transmitida.

Potência transmitida (HP)	Fluxo de óleo (Galões por minuto)
50	0,25
100	0,50
150	0,75
200	1,00
250	1,25
300	1,50
400	2,00
500	2,25

FONTE: M.FILHO(2009).

Por fim, sugerem-se alguns cuidados na aplicação deste sistema, quais sejam:

- Manter relações de transmissão sempre menores que 1:7;
- Deve-se evitar que o número de dentes da coroa seja um múltiplo do pinhão, evitando que, caso algum dente possua certo defeito, o rolete estejam em contato frequentemente;

- Recomenda-se uso de distâncias entre-centros de 30 a 50 vezes o passo da corrente. Evitar valores maiores que 80 vezes o passo pois a flexão devida ao peso próprio da corrente comprometerá o rendimento do sistema;
- As principais falhas relacionadas a este sistema são:
 - Alongamento da corrente, proveniente do desgaste das articulações e das roda dentadas.
 - Para evitar este efeito, limitar a velocidade da corrente a até 6m/s.
- Rompimento ou desgaste das articulações;
 - Evita-se tal ocorrência com a aplicação de lubrificante de viscosidade, quantidade e fluxo adequados.
- Falhas de fabricação e montagem;
 - Evitadas com um controle rígido de qualidade durante os processos.
- Desengrenamento do sistema;
 - Recomenda-se deixar uma folga na distância entre-centros calculadas, mas esta nunca superior a 2%.
- Correntes diferentes podem possuir uma mesma capacidade trativa, seja uma corrente simples com passo maior ou uma corrente múltipla com passo menor;
 - Correntes simples devem ser selecionadas se objetiva-se redução de custos e há espaço disponível para instalação do sistema de transmissão.
 - Correntes múltiplas devem ser escolhidas caso priorize-se um sistema com pequeno volume. Com a aplicação de correntes múltiplas será possível aumentar o número de dentes do pinhão, minimizando o efeito poligonal.

- A corrente sempre terá um ramo tenso e um ramo frouxo. Para tanto, atenta-se à posição de instalação. De Marco(2009) sugere a classificação apresentada na Figura 7;

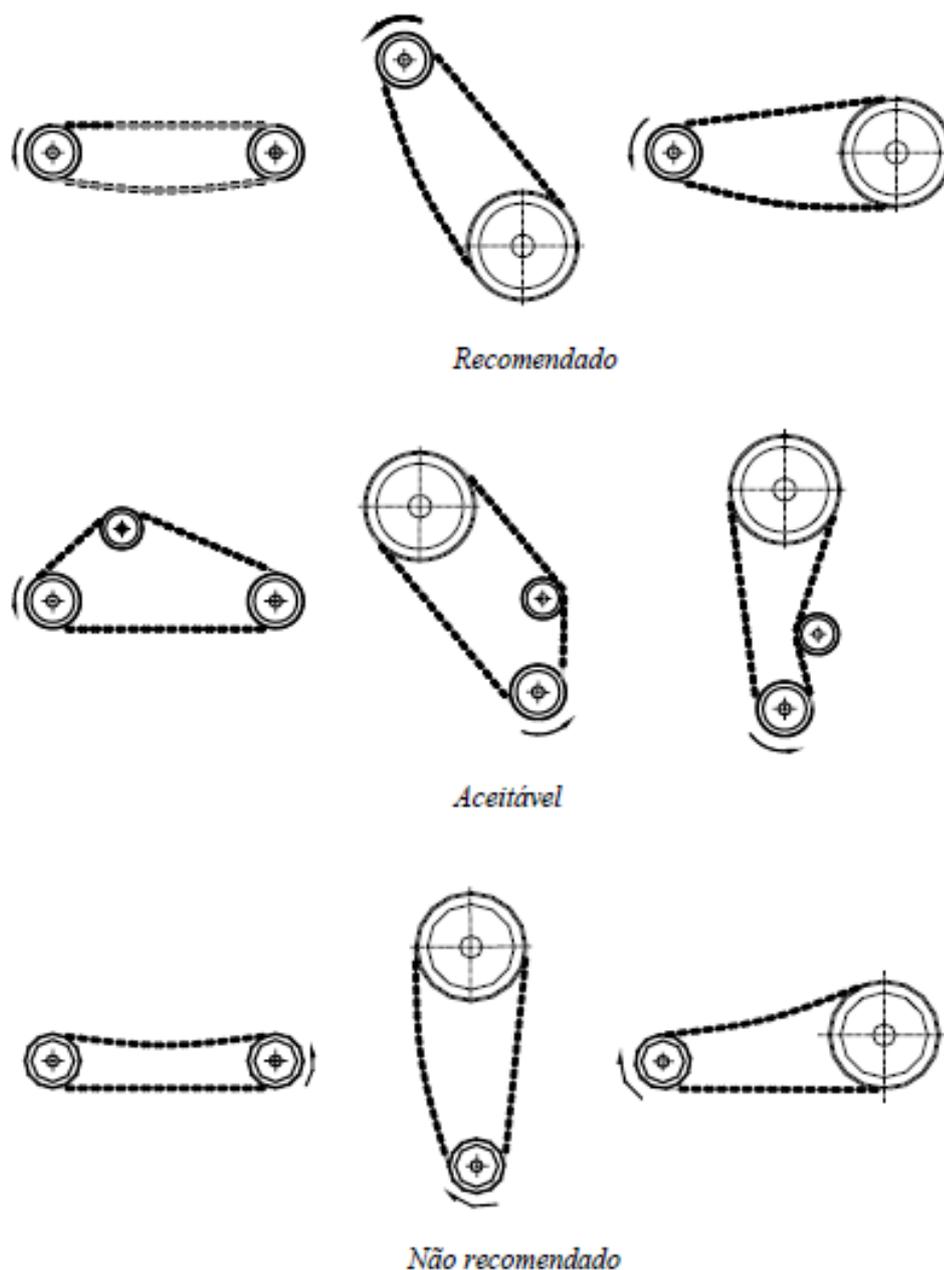


Figura 7 – Classificação das posições de montagem de rodas dentadas para corrente de rolos.

FONTE: M.FILHO(1965).

- Para minimizar a interferência do lado frouxo e para compensar possíveis desgastes e alongamentos da corrente, pode-se utilizar tensores, desde que instalados sempre no lado frouxo.

3 METODOLOGIA

3.1 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

Como primeiro passo no desenvolvimento do produto deste trabalho, foi feita a revisão bibliográfica sobre transmissões, partindo dos conceitos fundamentais, de modo a garantir um bom desenvolvimento do trabalho. A revisão bibliográfica foi mais aprofundada nos tópicos mais ligados a este projeto, por exemplo, nos tipos e funcionamento de sistemas transmissão de torque.

Concomitantemente à revisão, houve a coleta de dados sobre os protótipos da equipe Imperador UTFPR, como: dados do motor utilizado no protótipo (retirados do manual do fabricante), relação de transmissão ideal e as restrições de projeto como, por exemplo, o espaço físico existente no protótipo para instalação do sistema de redução. Foi feito ainda um estudo *benchmarking*, em que se compararam as características do sistema de transmissão de diversas equipes com o da Equipe Imperador UTFPR.

A partir destas informações levantadas na revisão e na coleta de dados, realizou-se o estudo das diversas possibilidades de transmissões propostas pela bibliografia. Nessa fase, foram buscadas as possibilidades que se mostraram úteis, procurando por variações das mesmas, de forma que um maior número de alternativas fosse encontrado. Conhecidas as possíveis variantes de sistemas de redução, as características importantes ao sistema, as restrições do projeto e os desejos da equipe, utilizou-se o sistema da “Casa da Qualidade” a fim de classificar em ordem de importância cada uma dessas características. Por fim, geraram-se alternativas que cumprissem cada um destes requisitos e, combinando a alternativa que atende melhor a cada uma das necessidades do produto, pôde-se definir o layout final do sistema. Em seguida, foi construído um modelo da transmissão, a ser montado num dos veículos da equipe.

Ao final deste processo, uma monografia completa foi gerada para ser entregue como parte da avaliação da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II.

Assim, os passos a serem seguidos para o cumprimento da metodologia são:

- Revisão bibliográfica e coleta de dados;

- Escolha e dimensionamento do sistema de transmissão mais adequado;
- Construção do modelo do sistema de transmissão, com o auxílio da equipe Imperador UTFPR;
- Comparação e análise dos resultados alcançados em relação ao esperado;
- Redação da monografia.

3.2 PRODUTOS DO PROJETO

Como produto deste trabalho, foi fabricada uma caixa de redução de acordo com os aspectos avaliados durante a realização deste trabalho. Este produto será posteriormente doado à Equipe Imperador UTFPR, que utilizará o sistema no protótipo que participará da competição Baja SAE Regional SUL 2014.

4 BENCHMARKING

Benchmarking é o processo de medir e comparar seus produtos, serviços e outras práticas com o de empresas concorrentes, e assim conhecer novas soluções que possam ser adotadas. O objetivo do *benchmarking* é estabelecer metas plausíveis, para buscar atingi-las (ROZENFELD, 2006).

Inserindo este conceito no contexto Baja SAE, serão analisados os sistemas de transmissão de equipes que têm obtido os melhores resultados nas competições nacional e mundial. O *benchmarking* deste trabalho foi feito utilizando-se de fotos e registros pertencentes ao acervo da equipe da UTFPR. As informações obtidas neste *benchmarking* foram traduzidas nos requisitos da qualidade, possibilitando assim um comparativo objetivo. Em seguida encontra-se um resumo descritivo de cada equipe analisada.

4.1 Equipe FEI Baja

O protótipo da FEI teve na competição nacional de 2013 os melhores resultados em aceleração e velocidade máxima entre todos os participantes. O sistema de transmissão desta equipe consiste em um redutor de engrenagens cilíndricas de dentes retos acoplado a um redutor planetário, possibilitando assim a utilização de duas marchas. A primeira marcha (maior redução) é usada apenas em situações especiais, como a prova de tração. Na Figura 8 pode-se observar como o planetário possibilita a mudança da relação de transmissão: a marcha reduzida é obtida liberando-se a movimentação das engrenagens planeta, o que faz com que a engrenagem sol tenha uma rotação menor do que a entrada (engrenagem anelar), conseguindo-se assim uma relação de transmissão maior.

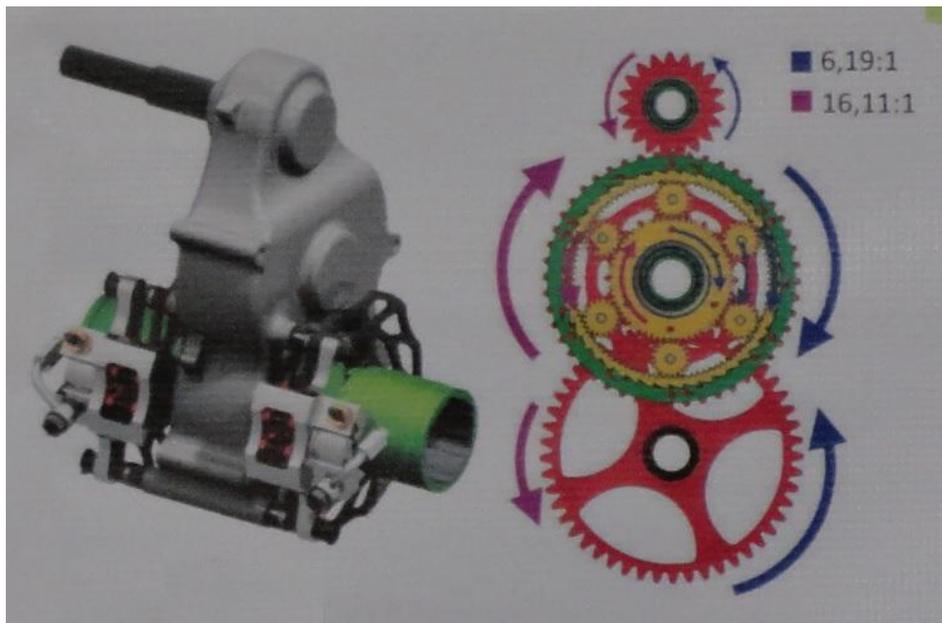


Figura 8 – Renderização do sistema utilizado pela equipe da FEI em 2013.

FONTE: Acervo da equipe Imperador UTFPR

4.2 EQUIPE EESC USP

O protótipo da EESC apresentou na competição nacional de 2013 um sistema de transmissão que consiste de uma caixa fechada com uma redução por corrente de rolos com duas carreiras, conforme a Figura 9. A redução é feita em apenas um estágio e é utilizado um esticador para se compensar o desgaste da corrente e das rodas dentadas. A coroa e a carcaça são feitas em alumínio 7075-T6 e os eixos e pinhão são feitos em aço SAE 8620. Os rolamentos são embutidos em mancais usinados em alumínio e parafusados na carcaça.

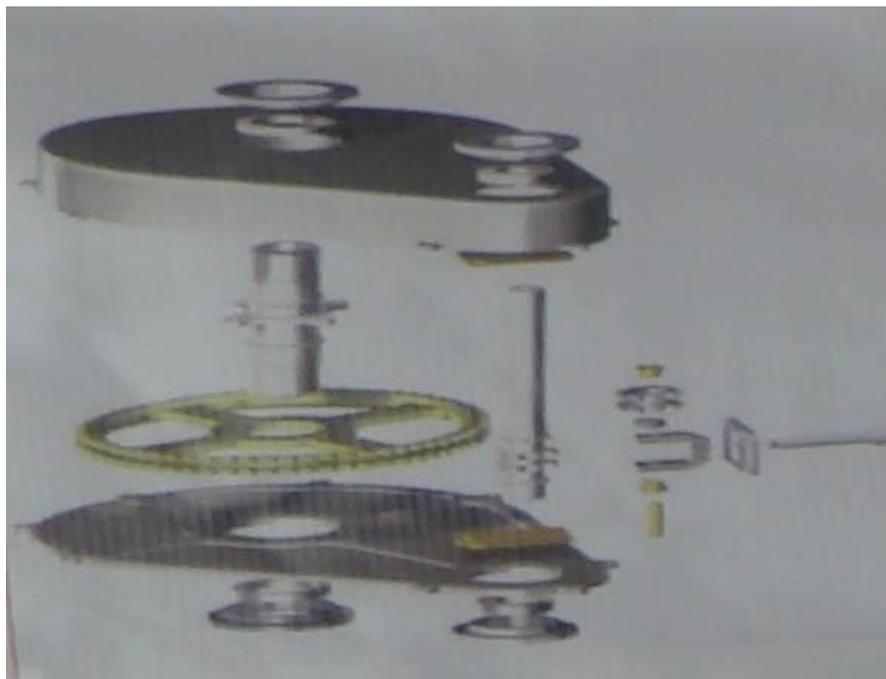


Figura 9 – Renderização do sistema utilizado pela equipe da EESC USP no ano de 2013.

FONTE: Acervo da equipe Imperador UTFPR

4.3 EQUIPE MANGUE BAJA (UFPE)

O protótipo desta equipe na competição nacional de 2013 utilizava um redutor de engrenagens cilíndricas de dentes retos. Composto por dois estágios de redução como pode ser visto Figura 10, o sistema tem uma redução fixa e utiliza uma carcaça de alumínio 7075-T6, eixos em aço SAE 1045 e engrenagens em aço SAE 8620, com cementação e têmpera. Os rolamentos são embutidos em cavidades usinadas na própria carcaça e montados juntamente com retentores, para vedação do sistema.

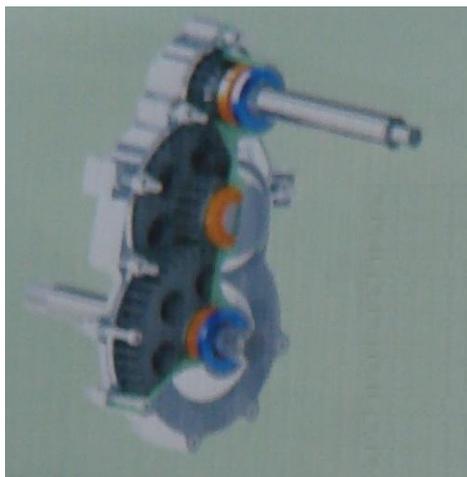


Figura 10 – Renderização do sistema utilizado pela UFPE no ano de 2013.

FONTE: Acervo da equipe Imperador UTFPR

4.4 EQUIPE UFSC DE BAJA SAE

O sistema utilizado por essa equipe consiste em uma caixa de engrenagens com três marchas, acoplada a outro redutor de engrenagens fixo. As marchas são usadas para tração, arrancada e cruzeiro. As carcaças são usinadas em alumínio 7075-T6 nas quais são embutidos diretamente os rolamentos. A Figura 11 mostra uma vista em corte deste sistema.

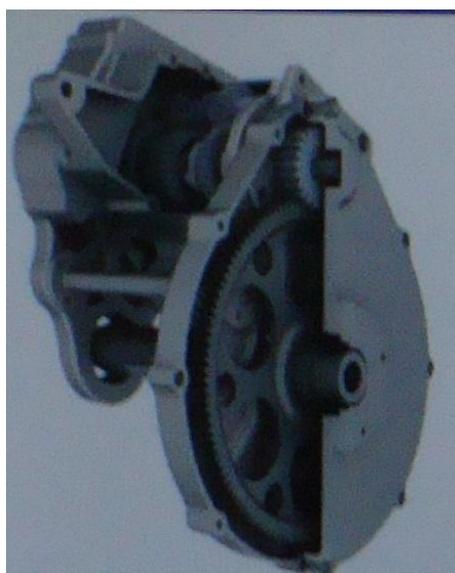


Figura 11 – Renderização do redutor utilizado pela equipe UFSC Puma em 2013.

FONTE: Acervo da equipe Imperador UTFPR

4.5 EQUIPE UFPBAJA (UFPB)

A redução fixa é feita em um único estágio utilizando corrente de rolos simples, ou seja, com apenas uma fileira de rolos. Utiliza-se um esticador na corrente para compensar o alongamento causado pelo desgaste. O sistema está exposto e sujeito às adversidades já descritas neste trabalho, como pode ser visto na Figura 12.



Figura 12 – Fotografia do sistema de redução aberto utilizado pela equipe UFPBaja em 2013.

FONTE: Acervo da equipe Imperador UTFPR

4.6 RESULTADOS

O Quadro 3 mostra os principais resultados encontrados, sendo que os valores sublinhados não puderam ser encontrados e por isso foram estimados. Esse estudo será utilizado mais tarde para o levantamento das metas a serem atingidas no produto em desenvolvimento no presente trabalho.

	FEI	EESC	UFSC	UFPBaja	Mangue Baja	Imperador UTFPR
Sistema	Caixa de Engrenagens com planetário	Corrente de rolos com duas fileiras e esticador	Caixa de engrenagens com três relações	Corrente de rolos com uma fileira e com esticador	Caixa de engrenagens com redução fixa	Corrente de rolos com duas fileiras
Número de Peças	Grande	Médio	Grande	Pequeno	Médio	17
Volume	Médio	Médio	Grande	Pequeno	Médio	3000cm³
Custo	R\$ 1.470,00	<u>R\$ 1.000,00</u>	<u>R\$ 4.000,00</u>	<u>R\$ 500,00</u>	R\$ 2.475,20	R\$ 637,75
Massa	5,65kg	3,90kg	<u>9,00kg</u>	<u>3,00kg</u>	6,20kg	6,80kg
Vedação a detritos	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Material da Carcaça	Al 7075-T6	Al 7075-T6	Al 7075-T6	Não possui	Al 7075-T6	Não possui
Material dos Eixos	SAE 4340	SAE 8620	SAE 4340	SAE 1045	SAE 1045	SAE 4340
Material das Rodas Dentadas	SAE 8620	Al 7075-T6	SAE 8620	SAE 1045	SAE 8620	Al 7075-T6
Tempo para 30m	3,944s	4,242s	4,320s	4,266s	4,351s	4,731s
Velocidade em 100m	54,0km/h	51,5km/h	48,7km/h	53,9km/h	50,5km/h	46,5km/h
Colocação Nacional 2013	2º	12º	3º	11º	5º	29º
Número de relações	2	1	3	1	1	1

Quadro 3 – Resumo dos resultados encontrados durante etapa de *benchmarking*.

5 LEVANTAMENTO DAS NECESSIDADES DA EQUIPE

5.1 DESCRIÇÃO DO INSTRUMENTO DE COLETA DE INFORMAÇÕES

Nesta etapa, reuniu-se a equipe para que fosse possível conhecer as reais necessidades que o veículo precisa estar preparado e quais características são efetivamente importantes para serem agregadas ao produto. Através de uma mesa redonda com os integrantes, foram apresentados vídeos, imagens e depoimentos sobre competições anteriores.

5.2 DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO DO INSTRUMENTO DE COLETA DE INFORMAÇÕES

A entrevista tipo mesa redonda foi realizada no laboratório da equipe no dia 09/03/2013. Neste momento estavam presentes o capitão da equipe, o gerente de projetos, o gerente de produção, os pilotos e os integrantes do subprojeto transmissão, estes que serão os responsáveis pela manutenção do produto quando ele for instalado no veículo.

Com a entrevista realizada foi possível confirmar e/ou constatar algumas informações importantes para o desenvolvimento do trabalho. São elas:

- A potência do motor utilizado pela equipe é muito restrita (10HP) e, portanto, a redução de massa é essencial para que se alcance resultados melhores que os concorrentes;
- Pela mesma restrição de potência, há uma grande preocupação com a eficiência do sistema;
- O projeto Baja SAE tem como uma das premissas o desenvolvimento de um produto que efetivamente possa ser comercializável. Neste caso, características como baixo custo e possibilidade de fabricação seriada são bem avaliadas;
- A principal etapa da competição, o Enduro de Resistência, tem duração de 4 horas ininterruptas. Se for necessária alguma manutenção no veículo, esta

deve ser feita no menor tempo possível para que se consiga reverter as posições perdidas.

Analisando os resultados obtidos, a equipe foi questionada a respeito de possíveis atributos que deveriam estar presentes na solução a ser desenvolvida. A partir de uma série de necessidades relatadas, selecionou-se aquelas de maior relevância e recorrência, que foram:

- Confiável
- Robusto;
- Leve;
- Simples;
- Fácil de substituir;
- Silencioso;
- Resistente;
- Pequeno.

6 PROJETO CONCEITUAL

6.1 INTRODUÇÃO

Definidos os objetivos do presente trabalho e os requisitos que o produto precisa possuir, atuou-se na solução da situação problema anteriormente descrita. Para isso, foi executado o aprofundamento sistemático do problema, desenvolvendo os requisitos da qualidade, a função global do produto e aplicação de alternativas de solução através da composição da matriz morfológica. Após a elaboração de cada uma das alternativas, avaliou-se seu desempenho segundo as especificações do projeto para definir a melhor alternativa.

6.2 DEFINIÇÃO DA TAREFA

O objetivo das próximas etapas consiste em mapear, mensurar, qualificar e avaliar, em termos de risco e importância, os principais requisitos do projeto. Ou seja, através da metodologia deseja-se transformar a “voz da equipe” em “voz da engenharia”.

6.3 REQUISITOS DE QUALIDADE

Como dito, os requisitos da qualidade são a interpretação das necessidades da equipe pelos projetistas a fim de se conhecer os requisitos técnicos do produto.

O Quadro 4 mostra os requisitos que se anseiam com o produto deste trabalho, as unidades utilizadas e a tendência que deve ser seguida em cada um deles.

Requisitos	Unidade	Tendência
Número de peças	nº	↓
Volume	cm ³	↓
Ciclos sem manutenção	nº	↑
Ruído	dB	↓
Preço	R\$	↓
Massa	Kg	↓
Rendimento	%	↑
Vedação a detritos	sim/não	Sim
Resistência mecânica	Pa	↑
Tempo de montagem no carro	segundos	↓

Quadro 4 – Requisitos do produto a ser desenvolvido.

6.4 CASA DA QUALIDADE

Seguindo a próxima etapa da metodologia escolhida classificaram-se as características do produto através da ferramenta QFD, também chamada de Casa da Qualidade.

Os requisitos da qualidade são avaliados em conjunto com as necessidades da equipe e classificados segundo sua importância, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação dos requisitos conforme método QFD.

		REQUISITOS DA QUALIDADE									Consumidor (1 a 5, sendo 5 mais importante)	
		Número de Peças	Volume	Ciclos sem Manutenção	Ruído	Preço	Massa	Rendimento	Vedação a detritos	Resistência Mecânica		Tempo de montagem
Forte: 5 Intermediário: 3 Fraco: 1 Inexistente: 0												
Tendência		↓	↓	↑	↓	↓	↓	↑	sim	↑	↓	
NECESSIDADES DO PRODUTO	Confiável	1	0	5	3	1	5	0	5	5	0	5
	Robusto	1	3	5	3	1	5	0	5	5	0	5
	Leve	5	5	0	0	3	5	3	0	3	0	5
	Simples	5	5	5	1	5	3	1	0	0	1	3
	Fácil de trocar	3	5	0	0	0	3	0	0	0	5	2
	Silencioso	1	0	1	5	1	0	5	3	0	0	1
	Resistente	1	0	5	3	3	1	3	5	5	0	5
	Pequeno	3	5	0	1	3	5	0	1	1	5	4
Unidade		nº	cm³	nº	dB	R\$	kg	%	sim/não	Pa	s	
Valor da Importância		74	85	91	57	68	115	38	82	94	33	
Classificação		6	4	3	8	7	1	9	5	2	10	

Percebe-se a grande importância para que o produto tenha baixo peso, característica já esperada após a mesa redonda realizada com a equipe. Um resultado que surpreendeu foi a disparidade na classificação entre a necessidade de que o sistema possua grande resistência mecânica e o tempo que este leva para ser montado. Entende-se isto pelo fato de que estas são características conflitantes: O tempo de montagem deve ser curto para que, se houver uma quebra durante a competição, a troca seja rápida. Todavia, a resistência deve ser elevada justamente para que não haja quebras, não havendo necessidade de se trocar o sistema, seja este um processo rápido ou lento.

6.5 ESPECIFICAÇÃO DO PRODUTO

Seguindo as etapas da metodologia, após a classificação dos requisitos do produto pôde-se mensurar os objetivos: as metas foram definidas de acordo com o *benchmarking*, e quando não se pode encontrar valores, com o protótipo anterior.

O Quadro 5 mostra as especificações do produto e suas avaliações.

Requisito	Objetivo	Sensor
Massa (1º)	Até 5 kg	Balança
Resistência mecânica (2º)	Coefficiente de Segurança $\geq 2,0$	Simulação Computacional
Ciclos sem Manutenção (3º)	40 horas	Cronômetro
Volume (4º)	Até 3000 cm ³	Análise do modelo em CAD
Vedação a Detritos (5º)	Vedação Total	Visual
Número de peças (6º)	Máximo de 20	Contagem
Preço (7º)	Até R\$1000,00	Contábil
Tempo de Montagem (8º)	Até 1 hora	Cronômetro

Quadro 5 – Especificações do produto.

Alguns objetivos foram determinados de maneira empírica, como por exemplo, o número de peças: estipulou-se que o sistema deveria possuir, no máximo, 20% mais peças que a quantidade utilizada no protótipo anterior.

7 DESENVOLVIMENTO DE ALTERNATIVAS

7.1 FUNÇÃO GLOBAL

Define-se a função global como um diagrama de blocos em que o bloco central declara a função do sistema de maneira condensada e abstrata, sem indicar uma possível forma de solucionar o problema (ROZENFELD, 2006). Após a formulação da função global, deve-se definir a interface do sistema, através do material que será necessário para o produto operar, a forma de energia para o seu funcionamento e também o sinal a partir do qual se percebe o acionamento do sistema. De maneira análoga, o produto tem que dar sinais da transformação realizada, sendo que estes sinais são semelhantes aos da entrada: o material acabado, a energia transformada e o sinal de término do processamento.

No presente trabalho não se definirá a função global, uma vez que se trata do desenvolvimento de um subsistema. Considerar-se-á apenas a função geral “amplificar torque”, tendo como entradas o torque e rotação do CVT e como saída o torque e rotação para as homocinéticas. Sendo esta função então desdobrada na estrutura funcional do produto a ser desenvolvido.

7.2 ESTRUTURA FUNCIONAL

Para facilitar o processo de encontrar soluções, desdobra-se a função geral em funções mais simples, funções parciais ou até mesmo elementares, sendo que o problema pode ser tratado então de forma mais fácil.

Devem-se identificar quais são as funções (verbo + substantivo) que o sistema deverá ter e em seguida arranjá-las de forma a representar a funcionalmente o produto (ROZENFELD, 2006). Assim, foram identificadas cinco subfunções básicas a partir da função global, como pode ser visto na Figura 13, de forma a descrever completamente o funcionamento do sistema.

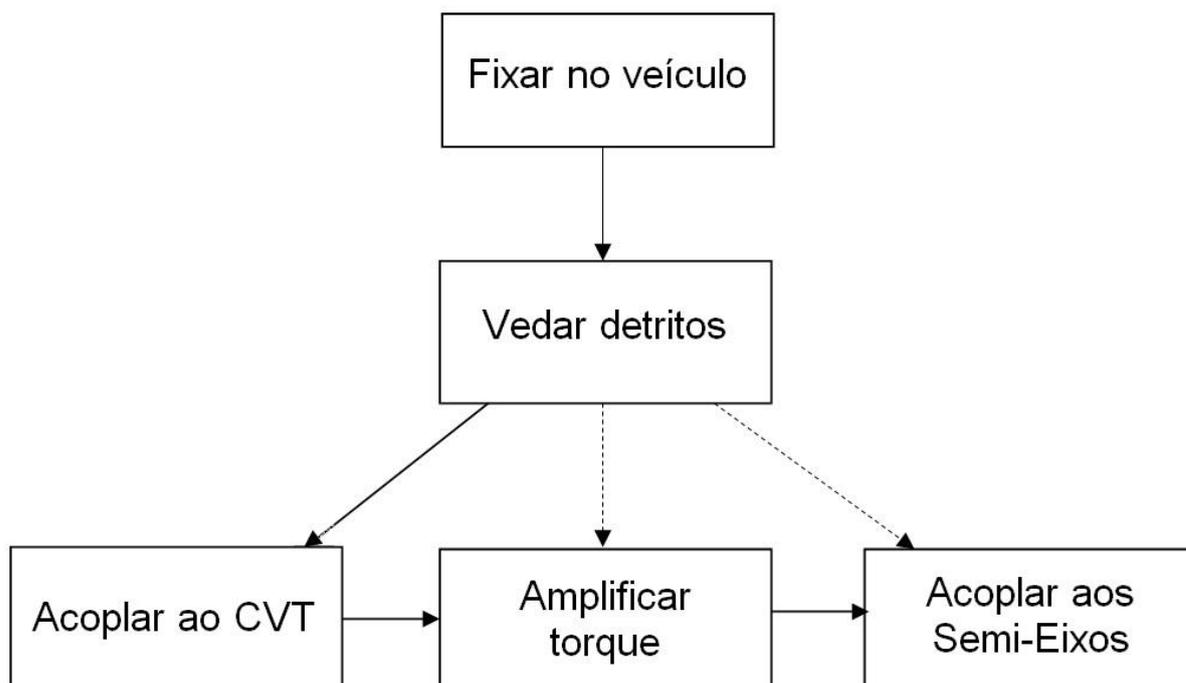


Figura 13 – Desmembramento da função geral.

7.3 GERAÇÃO DE ALTERNATIVAS

Para a geração de alternativas utilizou-se a estruturação das funções de modo a encontrar soluções para cada função individualmente, e então combinar as diferentes soluções através de uma matriz morfológica, buscando-se assim a melhor solução para o produto.

As funções acoplar ao CVT e acoplar aos semi-eixos são restrições de projeto, tendo em vista que a equipe já definiu quais CVT e homocinéticas serão utilizados e estes possuem sistema de acoplamento próprio. Assim, fica-se determinado que deve haver um eixo de entrada para a CVT e que este eixo deve ter as suas dimensões conforme a Figura 14.

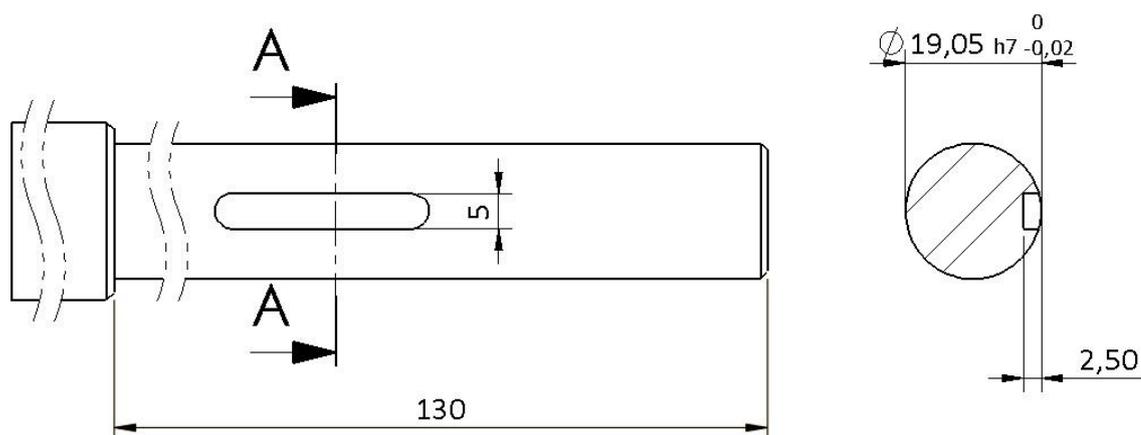


Figura 14 – Representação do acoplamento do eixo ao CVT.

As homocinéticas possuem um estriado externo para seu acoplamento, logo deverá ser usado o correspondente interno no sistema projetado, conforme Figura 15.



Figura 15 – Modelo de homocinética utilizado como padrão de acoplamento estriado a ser utilizado.

Definiu-se que a fixação do sistema no carro será feita por parafusos, restando apenas a diferenciação de como esta se apresenta no veículo, podendo ser estrutural ao veículo, ou seja, a carcaça contribui para a rigidez do chassi, pode-se utilizar uma estrutura tubular secundária que é então parafusada ao chassi, ou ainda parafusada diretamente no chassi do veículo.

Para a amplificação de torque as opções encontradas foram retiradas da revisão bibliográfica, sendo engrenagens cilíndricas de dentes retos ou helicoidais, corrente de rolos, e correias sincronizadoras. Foi considerada ainda a opção desta amplificação de torque ser feita em um ou dois estágios. As transmissões com engrenagens externas possuem a peculiaridade de inverter o sentido de rotação de entrada, considerando isso, deve-se inverter a montagem do motor, ou utilizar uma engrenagem vazia para que a rotação de saída seja apropriada.

A função vedar detritos exige o completo isolamento do sistema de transmissão com o meio externo, para isso foram elaboradas diversas formas construtivas de carcaças, diferenciando-se apenas na simplicidade obtida e na facilidade de fabricação.

As soluções para cada função foram agrupadas em uma matriz morfológica, conforme a Figura 16, para que se possa combiná-las formando diferentes arquiteturas conceituais para o sistema, (ROZENFELD, 2006).

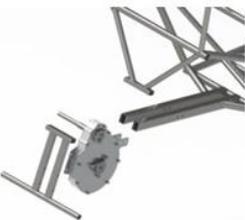
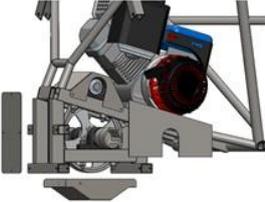
Fixar no Veículo	Vedar Detritos	Número/Tipos de Estágios	Amplificar Torque
Parafusado no Chassis 	Proteção usinada 	Com engrenagem vazia 	ECDH 
Parafusado em estrutura tubular e esta no Chassis 	Proteção em seções parafusadas 	1 estágio invertendo o sentido de rotação do motor (Apenas para ECDH ou ECDR) 	ECDR 
Parafusada no chassis com função estrutural 	Proteção tubular com tampas 	1 estágio mantendo o sentido de rotação do motor (Apenas correntes ou Correias) 	Correias Sincronizadoras 
		2 estágios 	Corrente de Rolos 

Figura 16 – Matriz morfológica do sistema a ser desenvolvido.

7.4 AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS

Conhecidas as diferentes alternativas possíveis para cada subfunção, combinaram-se estas características a fim de se buscar o produto que melhor atenda às necessidades listadas pela equipe. Algumas combinações foram descartadas por serem incompatíveis entre si como, por exemplo, uma redução feita em “um estágio invertendo o sentido de rotação” e sistema de amplificação de torque por correias sincronizadoras ou o uso de um sistema em dois estágios e com amplificações diferentes, como um estágio por engrenagem e um estágio por corrente de rolos, por exemplo.

Desta forma, o Quadro 6 apresenta as concepções de alternativas de solução avaliadas.

	Fixar no veículo	Vedar Detritos	Tipo/Número de Estágios	Amplificar Torque
Alternativa 1	Parafusado no Chassis	Proteção Usinada	1 estágio com engrenagem vazia	ECDH
Alternativa 2	Parafusado em estrutura tubular	Proteção em seções Parafusadas	1 estágio invertendo a rotação	ECDR
Alternativa 3	Parafusado com função estrutural	Proteção Usinada	2 estágios simples	ECDH
Alternativa 4	Parafusado em estrutura tubular	Proteção tubular com tampas	2 estágios simples	ECDR
Alternativa 5	Parafusado no Chassis	Proteção em seções Parafusadas	1 estágio simples	Corrente de Rolos
Alternativa 6	Parafusado com função estrutural	Proteção em seções Parafusadas	2 estágios simples	Correia Sincronizadora
Alternativa 7	Parafusado com função estrutural	Proteção Usinada	1 estágio simples	Corrente de Rolos
Alternativa 8	Parafusado em estrutura tubular	Proteção em seções Parafusadas	2 estágios simples	Corrente de Rolos
Alternativa 9	Parafusado com função estrutural	Proteção Usinada	1 estágio invertendo a rotação	ECDR

Quadro 6 – Combinação das alternativas que serão avaliadas.

7.5 DETALHAMENTO DAS ALTERNATIVAS

Combinadas as alternativas possíveis, cada concepção é detalhada individualmente a seguir para se analisar os aspectos positivos e negativos de cada opção.

7.5.1 ALTERNATIVA 1

7.5.1.1 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO

O sistema consiste de uma caixa usinada com três engrenagens, sendo que a terceira engrenagem possui um diâmetro relativamente grande, haja visto que esta precisa ser 5,5 vezes maior que a primeira engrenagem (dada a relação de transmissão adequada para o protótipo). As engrenagens possuem dentes helicoidais e o sistema é parafusado diretamente no chassi como pode se ver na Figura 17.

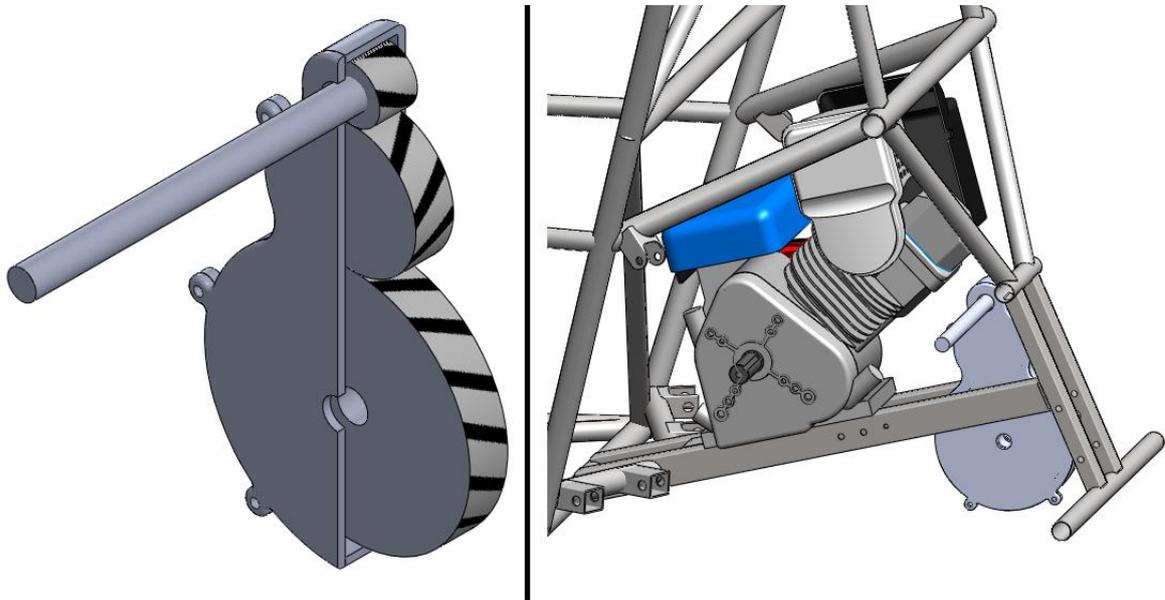


Figura 17 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 1.

7.5.1.2 AVALIAÇÃO

As vantagens deste sistema são:

- Bom rendimento e robustez além de um baixo ruído, pelo uso de ECDH;

- Excelente vedação, pela precisão dimensional do processo de usinagem;
- Médio número de peças (3 eixos, 6 rolamentos, 2 seções usinadas para proteção/fixação e 3 rodas dentadas).

As desvantagens deste sistema:

- Massa elevada, pela necessidade de utilizar rodas dentadas de aço;
- Dificuldade de montagem/desmontagem, pois o chassis, que é soldado, é reconhecidamente um item de baixa precisão dimensional e este será utilizado para fixar o redutor.
- Alto custo, proveniente da usinagem das seções e da aquisição das engrenagens;
- A última roda dentada do sistema (a mais próxima do solo) possui elevado diâmetro. Para evitar que esta entre em contato com o terreno é necessário angular os semi-eixos, sendo que este item possui diminuição de rendimento com o aumento do ângulo de trabalho;
- Necessidade de aquisição de rolamentos com resistência no sentido axial, devido ao esforço combinado no engrenamento.

7.5.2 ALTERNATIVA 2

7.5.2.1 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO

Uma desvantagem entre a transmissão por engrenagens em relação às transmissões por correia ou correntes é o fato de o sentido de rotação da engrenagem movida ser o inverso da engrenagem motora. Por este motivo, para se manter o sentido de rotação do motor utilizam-se engrenagens vazias, como a alternativa 1 ou então dois estágios, com o segundo retornando o sentido de giro que fora invertido durante o primeiro estágio. Nesta alternativa optou-se por inverter o sentido em que o motor é instalado no carro como visto na Figura 18.

7.5.2.2 AVALIAÇÃO

As vantagens deste sistema são:

- Bom rendimento e robustez, pelo uso de ECDR;
- Baixo número de peças (uso de apenas 1 par de engrenagens e eixos);
- Volume reduzido do sistema;
- Facilidade de montagem/desmontagem, por ser parafusado em estrutura tubular e esta sim no chassis.
- Médio custo, pois apesar do valor das rodas dentadas, usam-se apenas duas. Além disso, o sistema de vedação de detritos possui custo bastante inferior se comparado a uma proteção usinada.

As desvantagens deste sistema:

- Será necessário adaptar a posição do escapamento, uma vez que este em sua posição original estaria apontado para o piloto (por causa da inversão do sentido do motor);
- Adaptação do câmbio CVT, pois a polia movida reage de forma diferente às forças resistivas se esta estiver à esquerda ou à direita, por causa do sentido da hélice da polia.

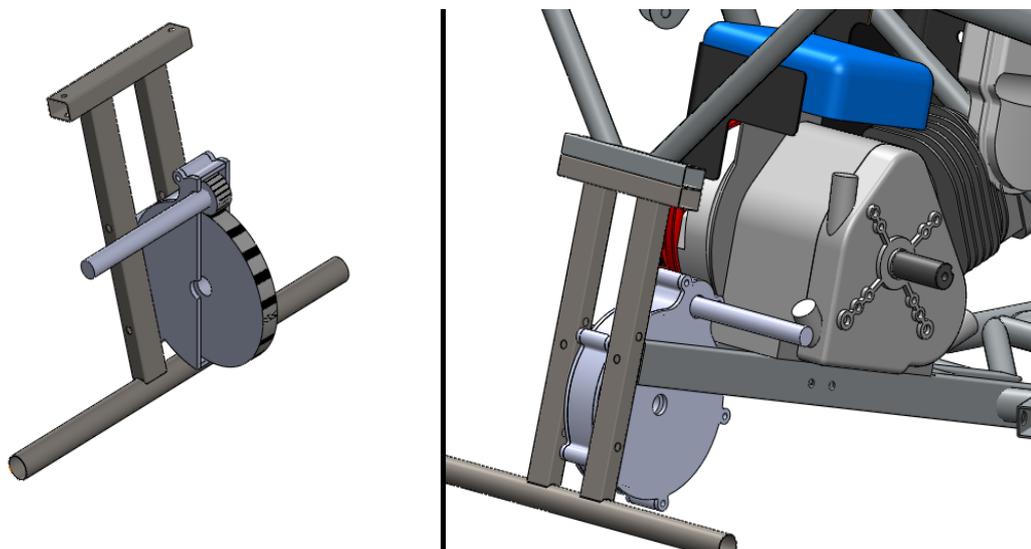


Figura 18 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 2.

7.5.3 ALTERNATIVA 3

7.5.3.1 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO

Este sistema é utilizado por diversas equipes participantes da competição. Seu principal diferencial é a sua função estrutural, diminuindo a massa da estrutura e facilitando a montagem/desmontagem pela inexistência de tubos do chassis em seu entorno, conforme a Figura 19. Além disso, por possuir dois estágios de ECDH, mantém um volume reduzido, uma vez que existem duas etapas para a redução.

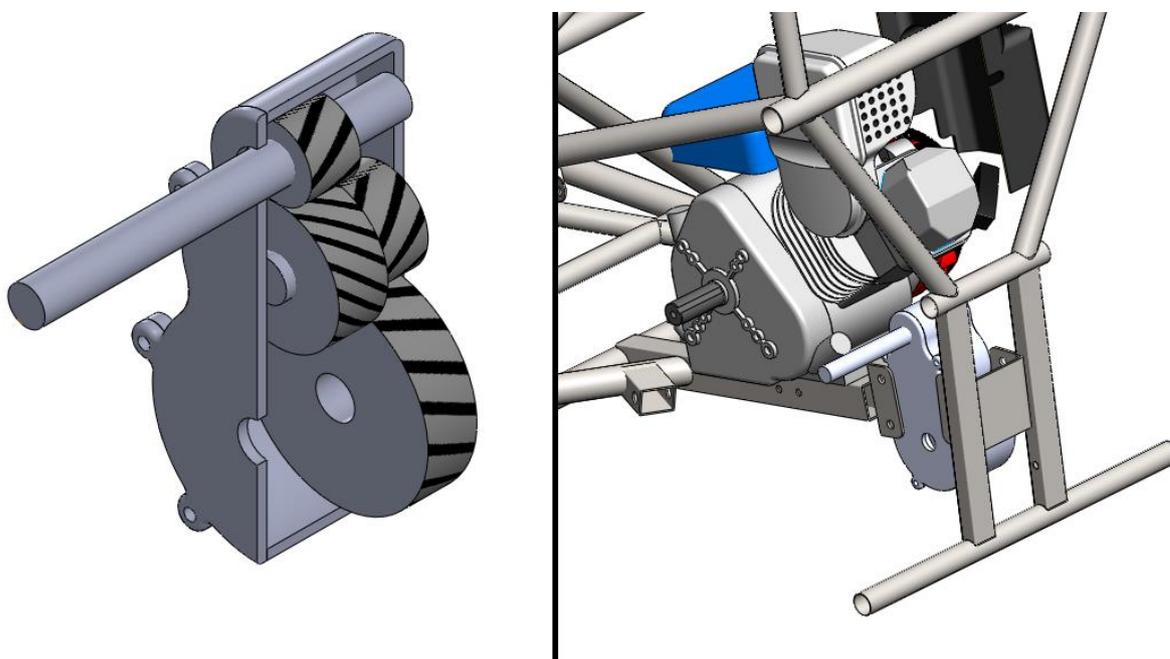


Figura 19 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 3.

7.5.3.2 AVALIAÇÃO

As vantagens deste sistema são:

- Massa reduzida do chassis e facilidade de montagem/desmontagem, por não existirem tubos em volta do redutor;
- Bom rendimento e robustez além de um baixo ruído, pelo uso de ECDH;
- Excelente vedação, pela precisão dimensional do processo de usinagem;
- Rodas dentadas pequenas, aumentando o vão entre o redutor e o solo.

As desvantagens deste sistema:

- Alto custo, proveniente da usinagem das seções e da aquisição das engrenagens;
- Massa elevada do redutor, pois este necessita de 3 eixos e 4 engrenagens;
- Necessidade de aquisição de rolamentos com resistência no sentido axial, devido ao esforço combinado no engrenamento;
- A integridade do redutor pode ser comprometida em caso de uma colisão na traseira do veículo, ocorrência possível durante a competição.

7.5.4 ALTERNATIVA 4

7.5.4.1 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO

Este sistema é o mais semelhante dentre as alternativas geradas com o utilizado anteriormente pela equipe. A principal diferença se deve ao uso de ECDR em vez de correntes, tornando o sistema mais robusto. As proteções laterais são compostas de chapas parafusadas ao chassis e a transmissão ocorre em dois estágios, para evitar o emprego de uma roda dentada de diâmetro excessivo. A Figura 20 contém uma representação desta alternativa

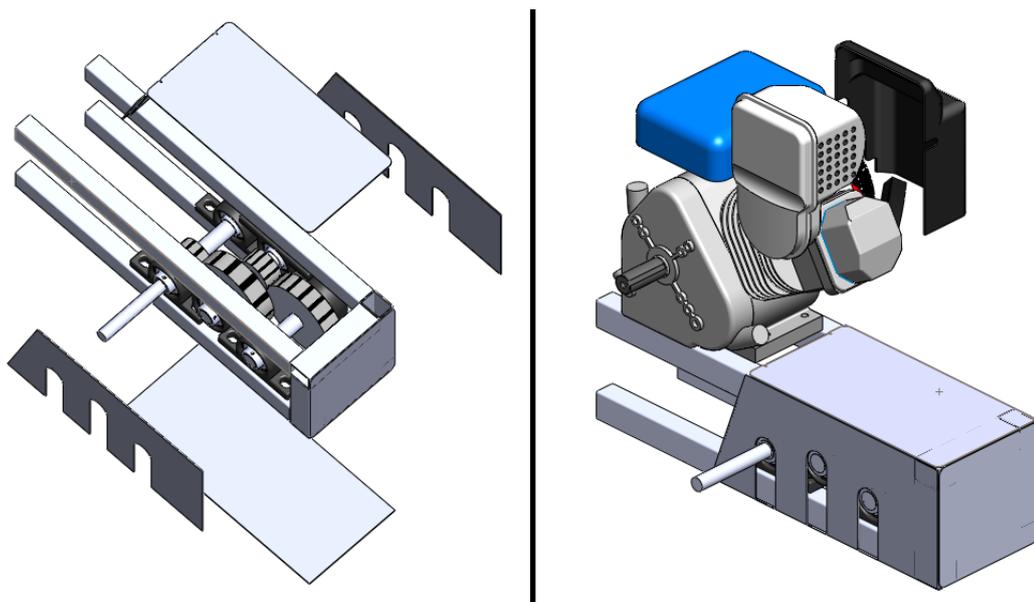


Figura 20 – Vista explodida e modelagem esboço para a alternativa 4.

7.5.4.2 AVALIAÇÃO

As vantagens deste sistema são:

- Custo médio, pois apesar de ser necessária a aquisição das rodas dentadas, o restante do sistema possui baixo custo e fácil fabricação;
- Robustez, pelo uso de ECDR e da rigidez da fixação do sistema.

As desvantagens deste sistema:

- Alto ruído proveniente do deslizamento dos dentes no engrenamento;
- Ausência de lubrificação, por não haver uma cavidade usinada;
- Baixo rendimento, se comparado aos outros sistemas estudados;
- Elevada massa, tanto das rodas dentadas como do chassis/proteções.

7.5.5 ALTERNATIVA 5

7.5.5.1 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO

Este sistema é, também, muito semelhante ao apresentado no protótipo anterior, colocando como melhoria a vedação a detritos, uma vez que a corrente de rolos estaria isolada do meio externo. Além disso, o sistema possibilita lubrificação da transmissão, através do banho de óleo na corrente. A utilização de apenas um estágio limita a distancia do sistema de redução ao solo, considerando o grande diâmetro da roda dentada movida (Figura 21).

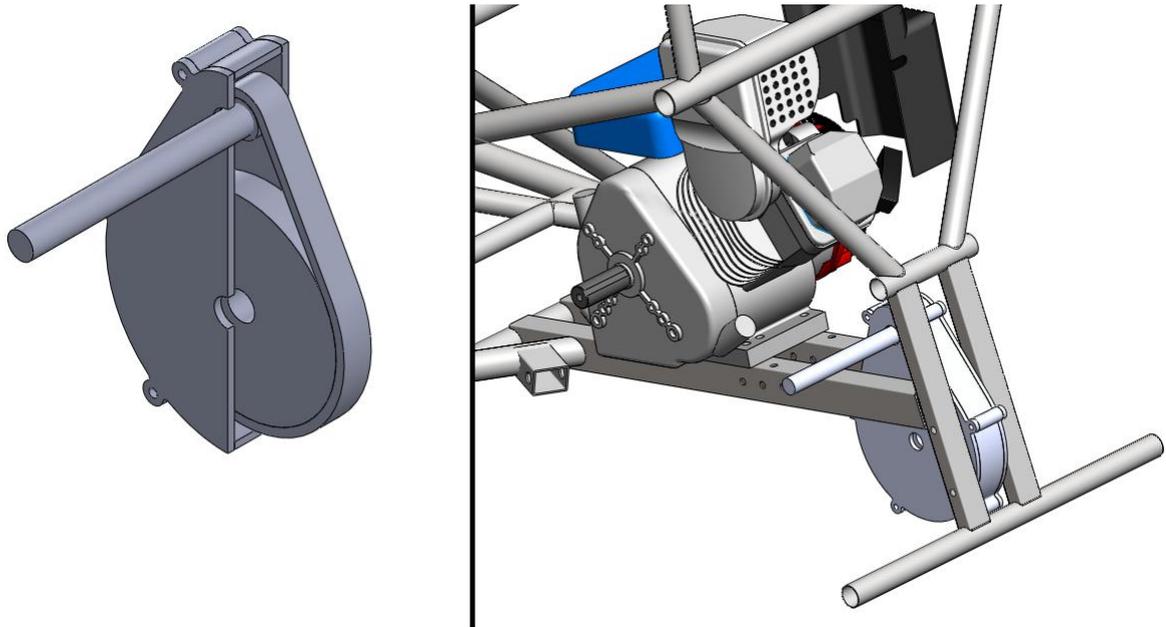


Figura 21 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 5

7.5.5.2 AVALIAÇÃO

As vantagens deste sistema são:

- Baixo número de peças (uso de apenas 1 par de engrenagens e eixos);
- Baixo custo pela utilização de corrente de rolos;
- Sistema dotado de simplicidade intrínseca;
- Facilidade de fabricação, uma vez que a carcaça pode ser feita utilizando sistemas de dois eixos de coordenadas, como corte a água ou laser;

As desvantagens deste sistema:

- Dificuldade de montagem/desmontagem do veículo, pois o chassis, que é soldado, é reconhecidamente um item de baixa precisão dimensional e este será utilizado para fixar o sistema de transmissão;
- A última roda dentada do sistema (a mais próxima do solo) possui elevado diâmetro. Para evitar que esta entre em contato com o terreno é necessário angular os semi-eixos, sendo que este item possui diminuição de rendimento com o aumento do ângulo de trabalho;

- A utilização de carcaça em três partes dificulta a montagem do sistema;

7.5.6 ALTERNATIVA 6

7.5.6.1 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO

Este sistema caracteriza-se como o mais original dentre os listados, visto que não foram encontrados registros de equipes que utilizaram correias sincronizadoras em suas transmissões. A redução seria feita em dois estágios como mostrado na Figura 22. Além disso, há grande redução de massa, uma vez que as rodas dentadas para esta aplicação podem ser fabricadas em alumínio.

7.5.6.2 AVALIAÇÃO

As vantagens deste sistema são:

- Massa reduzida do chassi e facilidade de montagem/desmontagem, por não existirem tubos em volta da transmissão;
- Bom rendimento e baixo ruído, pelo uso de correias sincronizadoras;
- Não há necessidade de lubrificação;
- Sistema mais leve por permitir a utilização de polias de alumínio;

As desvantagens deste sistema:

- Altíssimo custo das correias e polias;
- A utilização de carcaça em três partes dificulta a montagem do sistema;
- Grande número de peças (três eixos e quatro polias);
- A integridade do sistema pode ser comprometida em caso de uma colisão na traseira do veículo, ocorrência possível durante a competição.

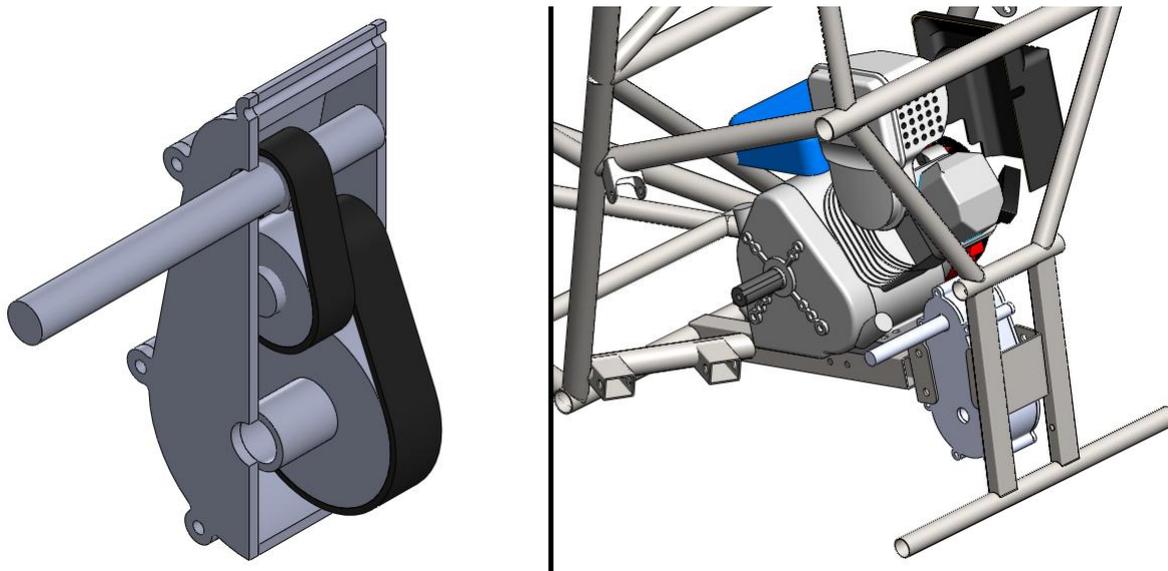


Figura 22 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 6.

7.5.7 ALTERNATIVA 7

7.5.7.1 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO

A principal diferença desta com a alternativa 5 é a utilização de invólucro usinado bipartido, além da estruturalidade do conjunto como pode se observar na Figura 23. Isto representa redução de massa no chassis ao mesmo tempo em que incorre em aumento de custos, uma vez que seria necessário um processo de usinagem com grande retirada de material.

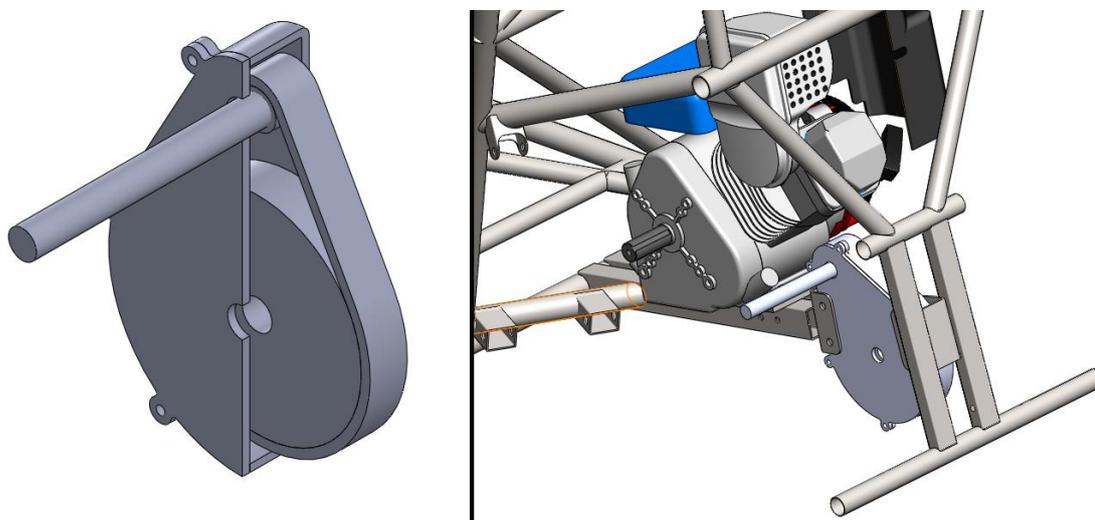


Figura 23 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 7.

7.5.7.2 AVALIAÇÃO

As vantagens deste sistema são:

- Massa reduzida do chassis e facilidade de montagem/desmontagem, por não existirem tubos em volta da transmissão;
- Excelente vedação, pela precisão dimensional do processo de usinagem;
- Baixo custo pela utilização de corrente de rolos;
- Sistema dotado de simplicidade intrínseca;

As desvantagens deste sistema:

- A integridade do sistema pode ser comprometida em caso de uma colisão na traseira do veículo, ocorrência possível durante a competição.
- Usinagem da carcaça complexa e com grande desperdício de material;
- A última roda dentada do sistema (a mais próxima do solo) possui elevado diâmetro. Para evitar que esta entre em contato com o terreno é necessário angular os semi-eixos, sendo que este item possui diminuição de rendimento com o aumento do ângulo de trabalho.

7.5.8 ALTERNATIVA 8

7.5.8.1 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO

Muito similar a alternativa 5, porém a redução se dá em dois estágios (Figura 24). Assim, permite-se a redução do diâmetro da roda dentada final e torna-se possível o aumento da altura do protótipo ao solo e a diminuição do ângulo de trabalho da homocinética.

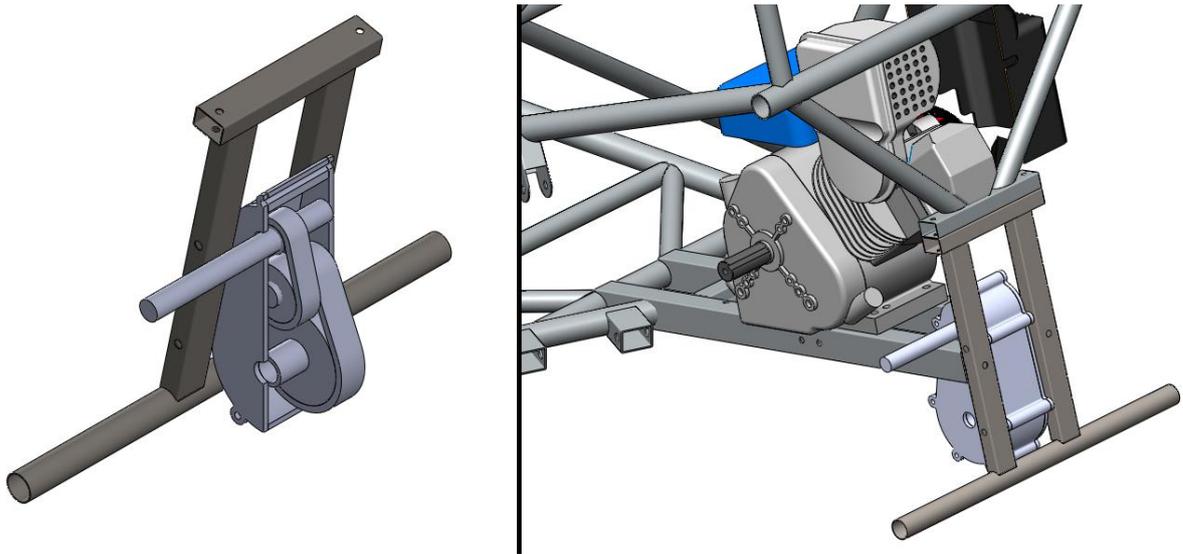


Figura 24 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 8.

7.5.8.2 AVALIAÇÃO

As vantagens deste sistema são:

- Menor diâmetro da roda dentada final, uma vez que a redução se dá em dois estágios. O que possibilita uma maior distância do veículo ao solo;
- A utilização de corrente de rolos faz com que esta alternativa possua baixo custo;
- O sistema está isolado do meio externo, tornando possível ainda a lubrificação eficiente das correntes;
- Facilidade de fabricação, uma vez que a carcaça pode ser feita utilizando sistemas de apenas dois eixos de coordenadas, como corte a água ou laser;

As desvantagens deste sistema:

- Grande número de peças (três eixos e quatro rodas dentadas);
- A utilização de carcaça em três partes dificulta a montagem do sistema;
- Necessidade de se trocar a corrente periodicamente, aumentando o custo de manutenção.

7.5.9 ALTERNATIVA 9

7.5.9.1 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO

Muito similar à alternativa 2, este sistema consiste em utilizar uma redução de engrenagens em apenas um estágio, invertendo-se a montagem do motor. Como pode se ver na Figura 25 as diferenças consistem em utilizar uma carcaça mais robusta, possibilitando que a mesma seja estrutural ao chassi e ainda a utilização de engrenagens de dentes retos com o objetivo de reduzir de custos.

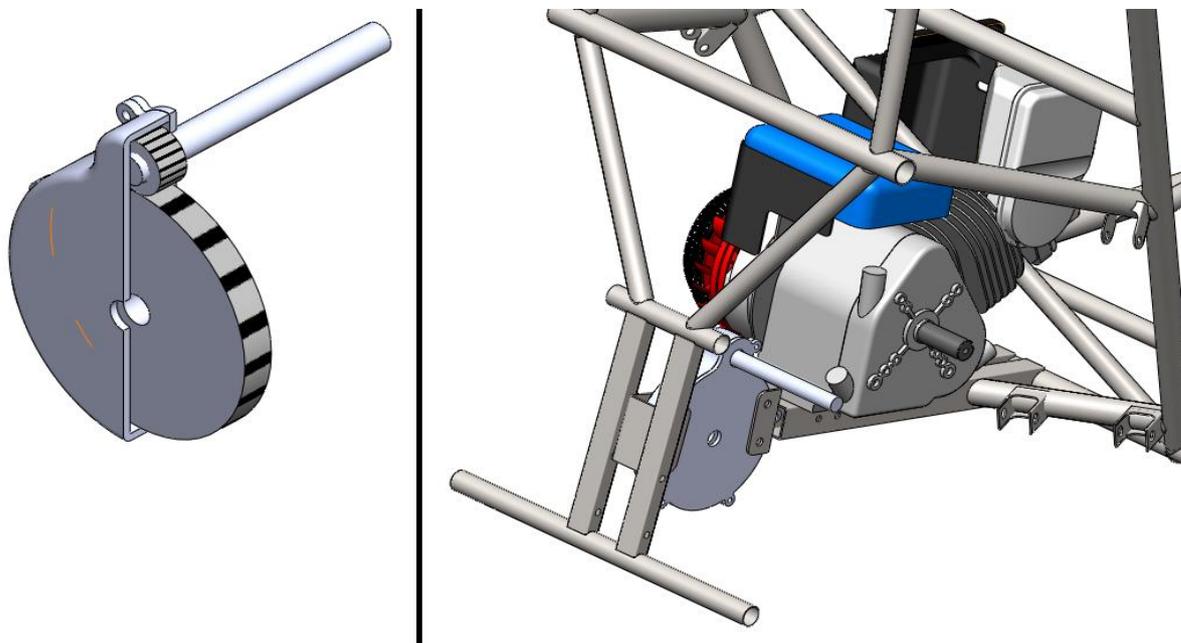


Figura 25 – Vista em corte e modelagem esboço para a alternativa 9.

7.5.9.2 AVALIAÇÃO

As vantagens deste sistema são:

- Bom rendimento e robustez, pelo uso de ECDR;
- Baixo número de peças (uso de apenas 1 par de engrenagens e eixos);
- Volume reduzido do sistema;

As desvantagens deste sistema:

- Será necessário adaptar a posição do escapamento, uma vez que este em sua posição original estaria apontado para o piloto (por causa da inversão do sentido do motor);
- Adaptação do câmbio CVT, pois a polia movida reage de forma diferente às forças resistivas se esta estiver à esquerda ou à direita, por causa do ângulo de hélice da polia.

7.6 SELEÇÃO DA SOLUÇÃO

Utilizou-se uma matriz de avaliação mista para selecionar a melhor solução. Esta matriz, apresentada no Quadro 7 utiliza um fator multiplicador de acordo com a ordenação encontrada na etapa da listagem dos requisitos do produto. Desta maneira, o requisito “massa” possui fator multiplicador 10, enquanto o fator “tempo de montagem” tem fator 1, por exemplo.

Feito esta listagem, utiliza-se a alternativa 1 como referência para cada uma das características classificadas e as outras alternativa são comparadas com +1 (mais adequado), -1 (menos inadequado) ou 0 (semelhante) em cada requisito. Multiplicando-se este valor pelo fator do requisito do produto, sabe-se qual a opção que mais se ajusta às necessidades definidas (ROZENFELD, 2006).

Descrição	Fator Multiplicador	Alternativas (1 é pontuada como 0 por ser a referência)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Massa	10	0	0	1	-1	1	1	1	1	1
Resistência Mecânica	9	0	0	-1	0	-1	0	-1	0	0
Ciclos sem Manutenção	8	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0
Volume	7	0	0	0	0	1	-1	1	1	0
Vedação a detritos	6	0	0	0	-1	0	0	0	0	-1
Número de Peças	5	0	1	0	0	1	0	1	0	-1
Preço	4	0	1	-1	1	1	-1	0	1	-1
Ruído	3	0	-1	0	-1	-1	0	-1	-1	0
Rendimento	2	0	-1	0	-1	-1	1	-1	-1	0
Tempo de Montagem	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
Somatório		0	5	-2	-16	4	-6	1	9	-4

Quadro 7 – Resultado da Matriz de Avaliação Mista.

8 DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO E *LAYOUT*

A solução que melhor atende às necessidades apresentadas pela equipe é uma transmissão por corrente de rolos, em dois estágios, fixada em uma estrutura parafusada ao chassis e vedada a partir de uma proteção composta de seções parafusadas, a solução número 08. A Figura 26 mostra como ficou o layout final do sistema desenvolvido.

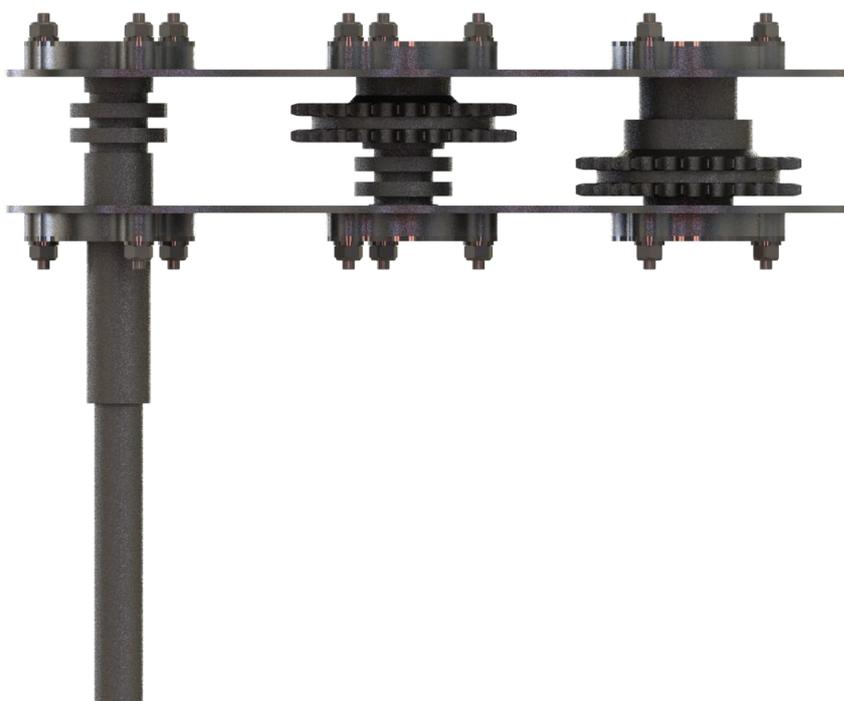


Figura 26 – Disposição dos eixos e engrenagens no produto final.

Como citado anteriormente, esta alternativa possui como principais vantagens a massa reduzida, custo bastante inferior às outras opções bem como um excelente rendimento, desde que mantida a lubrificação adequada.

A partir da definição da solução, atuou-se no projeto do sistema. O foco durante o desenvolvimento desta solução esteve ligado à validação das características levantadas como vantagens do sistema. Assim, buscou-se investigar a real possibilidade, por exemplo, de se utilizar um processo de corte por jato d'água

na fabricação da carcaça (em detrimento a utilização de centros de Usinagem CNC) o que fora citado como vantagem durante a seleção desta solução.

Apresenta-se, então, um breve detalhamento de cada item utilizado bem como os motivos que apoiaram tais escolhas.

8.1 DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO

8.1.1 EIXOS

Característica bastante elogiada pelos juízes da SAE nas últimas competições, optou-se por fabricar os pinhões diretamente nos eixos, sem o uso de acoplamento. A grande vantagem desta aplicação consiste na diminuição dos concentradores de tensão intrínseco aos sistemas convencionais de acoplamentos, como chavetas ou estriados. Neste caso, por se utilizar pinhões com 11 dentes não houve acréscimo no diâmetro dos tarugos, de 1 ½”, valor este que já seria o necessário mesmo que se utilizassem acoplamentos.

Optou-se por padronizar o material dos três eixos da caixa de redução com o uso do aço SAE 4340. Com a utilização deste material obtêm-se grande resistência mecânica e excelente resistência ao desgaste (CHIAVERINI, 1996) este necessário para garantir boa vida útil ao pinhão e, conseqüentemente, ao eixo.

8.1.2 PROTEÇÕES LATERAIS

Pela solução escolhida, o componente está submetido apenas a esforços no sentido radial em relação aos eixos (NIEMANN, 1971). Desta forma, pôde-se utilizar um material com menor resistência mecânica, dando maior preocupação à precisão dimensional, já que esta peça fixará os mancais e estes exigem maior cuidado com relação às tolerâncias.

Dessa maneira, optou-se pela utilização de chapas de alumínio 5052-F, com 3mm de espessura, cortadas a jato d'água. As principais características deste processo são (MOMBER, 1998):

- Elevada precisão dimensional, atribuída ao posicionamento CNC;

- Baixo impacto ambiental, pela pequena geração de resíduos;
- Custo 72% inferior, em média, à usinagem;
- Velocidade de trabalho apenas 20% inferior ao corte a laser;
- Usinagem de praticamente qualquer matéria-prima, desde chapas de aço até granito;
- Corte de grandes espessuras (até 180mm de aço, por exemplo) com a variação da pressão e do material abrasivo.

O layout final da peça é apresentado na Figura 27.



Figura 27 – Vista isométrica da proteção lateral em CAD.

8.1.3 PROTEÇÃO TANGENCIAL

Este componente, além da função de vedar o sistema deve absorver eventuais esforços advindos do rompimento da corrente de transmissão. Optou-se pelo uso do Poliacetal Copolimérico (POM), cujas principais qualidades (CALLISTER, 2012) são o baixo custo, a possibilidade de se fabricar peças injetadas (excelente opção para o caso de produção em massa do sistema) além de ser um polímero reciclável.

O modelo, Figura 28, foi fabricado também pelo processo de corte a jato d'água, pela rapidez e disponibilidade com os patrocinadores da Equipe Imperador UTFPR mas, como citado, recomenda-se avaliar a opção de se utilizar o processo de injeção para fabricação em larga escala, seja pelo menor custo como também pela economia de matéria-prima, inerente a este processo.



Figura 28 – Vista isométrica da proteção tangencial em CAD.

8.1.4 MANCAIS

Optou-se por utilizar rolamentos rígidos de esferas para suportar os eixos dada a natureza apenas radial dos esforços no sistema, já citada anteriormente. Com isso, reduziu-se a massa dos mancais, Figura 29, em cerca de 41% se comparado ao modelo anteriormente utilizado (Figura 30) uma vez que, mesmo sendo o menor modelo comercialmente encontrado, este possui massa proibitiva para esta aplicação.

Os mancais foram cortados a jato d'água e posteriormente usinados, dada a necessidade de precisão dimensional na sede do rolamento.



Figura 29 – Vista explodida do mancal feito a partir de chapas de alumínio.



Figura 30 – Caixa de mancal utilizada anteriormente pela equipe Imperador UTFPR.

8.1.5 ROLAMENTOS, CORRENTE E COROA

Como se tratam de itens comerciais optou-se por adquiri-los em lojas da região metropolitana de Curitiba.

A corrente utilizada possui passo $\frac{3}{8}$ ", com duas carreiras. Optou-se por esta medida pois, com menores passos obtém-se um sistema mais compacto, leve e com menor ruído se comparado à corrente com resistência equivalente mas com apenas uma carreira, de passo $\frac{1}{2}$ " (NIEMANN, 1971)

As coroas possuem 27 dentes para, engrenadas com os pinhões de 11 dentes, amplificarem o torque na relação de transmissão adequada ao protótipo.

Os rolamentos são do tipo 61905 2RS1, vedados, eliminando possíveis problemas de contaminação da pista/rolos com poeira ou detritos.

8.1.6 MONTAGEM

Por fim, as Figuras 31, 32 e 33 mostram o conjunto montado bem como o sistema para fixá-lo ao protótipo.



Figura 31 – Modelagem da caixa com sistema para fixação no veículo.



Figura 32 – Vista explodida da montagem da caixa de transmissão.



Figura 33 – Modelagem da caixa de transmissão montada no chassi da equipe.

9 CONCLUSÃO

Obteve-se, com a conclusão deste trabalho, o desenvolvimento de um novo conceito de transmissão para o protótipo da equipe Imperador UTFPR de Baja.

Entende-se que o projeto cumpriu parcialmente as diversas necessidades inicialmente levantadas, durante a fase de pré-projeto. A salientar a massa de 4,68kg (meta de até 5kg), o volume do sistema é 61% inferior ao inicialmente proposto, todo o conjunto possui 17 peças (Máximo de 20) e obteve-se um custo de R\$588,20, computados matéria-prima e mão-de-obra.

Com a proximidade entre as competições, alterar o chassis do carro atual da equipe para o uso do novo sistema de transmissão demandaria um tempo indisponível neste momento, de acordo com o cronograma da equipe. Optou-se, em reunião com os integrantes, aguardar o término da competição nacional de 2014 para então trabalhar nesta adaptação.

Por fim, recomenda-se em trabalhos futuros o estudo aprofundado de dinâmica longitudinal, a fim de se estabelecer o valor de relação de transmissão ideal para o protótipo, uma vez que, mesmo com um sistema de redução confiável, um veículo com relação de transmissão insuficiente ou exagerada deverá ter resultados dinâmicos inexpressivos. Além disso deve-se ser feito um trabalho contemplando as etapas de projeto preliminar e detalhado.

Recomenda-se, também, o acompanhamento de novas tecnologias no emprego de transmissão por correias sincronizadoras para alto torque. Esta opção se mostrou bastante adequada para aplicação em veículos tipo baja. Sua principal desvantagem é o elevado custo para ser aplicado. Todavia, com o avanço da tecnologia, espera-se uma diminuição nos custos e, assim, uma nova avaliação deve ser feita neste sentido.

REFERÊNCIAS

- A.T.I. BRASIL ARTIGOS TÉCNICOS INDUSTRIAIS LTDA., **Transmissão à correia sincronizada**. Curitiba: A.T.I. Brasil, 2012. 99 p.
- DOBROVOLSKY, V., **Machine Elements – A textbook**. 1 edição. Mir Publishers, Moscow, 1965. 492 p.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**: Características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. São Paulo, SP: ABM, 1996. 599p
- CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012. xxi, 817p.
- DUDLEY, D.W. **Handbook of practical gear design**. New York: McGraw-Hill, c1984. 1 v. 948 p.
- DE MARCO Filho, F. **Elementos de transmissão flexíveis**. 2 ed. Departamento de Engenharia Mecânica, Poli/UFRJ, 2009. 143 p.
- NIEMANN, G. **Elementos de Máquinas – Volume 2**. 3 ed. Edgar Blücher 1971. 207 p.
- NORTON, R.L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 2 ed. Bookman, 2004. 932 p.
- MOMBER, A.W., Kovacevic, R. **Principles of Abrasive Water Jet Machining**, Springer, London, 1998, 394p.
- PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering design: a systematic approach**. 2 ed. London: Springer- Verlag, c1996. 544 p.
- ROZENFELD, H, **Gestão de desenvolvimento de produtos**: Uma referência para a melhoria do processo. São Paulo, SP: Saraiva, 2006. 542p.
- SHIGLEY, J.E. **Elementos de maquinas 2**. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos, 1984. 700p.

APÊNDICE A – OUTROS CASOS DE FALHAS

Como citado no Item 1.1, o sistema de transmissão atual da Equipe Imperador era suscetível a esforços superiores aos esperados, principalmente devido à exposição de seus componentes. São apresentadas abaixo situações ocorridas durante competições Baja SAE no período de 2009 a 2012 que culminaram na parada do protótipo para conserto, acarretando em prejuízo de tempo durante a prova e, conseqüentemente, na piora da posição geral da equipe na competição.



Figura 34 – Fratura dos dentes do pinhão - Baja SAE Brasil 2011.

A falha apresentada na Figura 34 ocorreu na prova “Enduro de resistência” da competição Baja SAE Brasil 2011. Seguindo a recomendação do regulamento da competição, foi instalada em todo o contorno do sistema de transmissão uma proteção para evitar a ocorrência de acidentes com pessoas com membros próximos à transmissão. Após contato com algum detrito da pista, esta proteção teve uma peça em contato com as partes girantes da transmissão e, após certo tempo, o carro parou, pois o eixo não possuía mais a geometria necessária para tracionar a corrente.



Figura 35 – Corrente rompida - Testes para Baja SAE Brasil 2012.

No segundo dia de testes para a competição Baja SAE Brasil 2012, o piloto passou sobre um meio-fio na rua e, neste momento, ouviu-se um estampido agudo, acompanhado da parada do protótipo. Verificou-se, então, que a corrente havia se rompido como mostra a Figura 35, provavelmente pelo impacto causado ao sistema. Posteriormente, constatou-se também que a coroa havia sido danificada, como mostra a Figura 36.



Figura 36 – Falha nos dentes da coroa - Testes para Baja SAE Brasil 2012.