

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

CHARLES HENRIQUE MICHALAK

SIMULAÇÃO VIRTUAL DE SISTEMA DE TRANSMISSÃO CVT BASEADO EM
BENCHMARKING

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2017

CHARLES HENRIQUE MICHALAK

**SIMULAÇÃO VIRTUAL DE SISTEMA DE TRANSMISSÃO CVT BASEADO EM
*BENCHMARKING***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Coordenação de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Msc. Henrique Ajuz Holzmann

GUARAPUAVA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Guarapuava
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de Engenharia Mecânica
Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

SIMULAÇÃO VIRTUAL DE SISTEMA DE TRANSMISSÃO CVT BASEADO EM *BENCHMARKING*

por

CHARLES HENRIQUE MICHALAK

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 28 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Msc. Henrique Ajuz Holzmann
Prof. Orientador

Prof. Maurício Daniel Marczal
Membro Titular

Msc. Ricardo Bubna Biscaia
Membro Titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

MICHALAK. C. H., 2017. **SIMULAÇÃO VIRTUAL DE SISTEMA DE TRANSMISSÃO CVT BASEADO EM BENCHMARKING**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2017.

O presente trabalho é a proposição de um arranjo de transmissão, baseando-se em sistemas já consolidados no cenário da Engenharia Mecânica. Pelas características de aproveitamento do torque do motor e pela simplicidade do sistema optou-se pelo desenvolvimento de uma transmissão CVT (*Continuously Variable Transmission*). Ao se conhecer os componentes aplicados nas transmissões de modo geral e os elementos das transmissões CVTs, aplicou-se o conceito de Benchmarking que se resume em aproveitar o melhor de cada ideia. O modelo proposto constitui de dois pares de polias variadoras sendo que um par é ligado ao eixo do motor e o outro par é ligado à um sistema planetário que transmite a relação de transmissão final. Para simular o sistema foi utilizado o software de CAD (*Computer Aided Design*) *SOLID WORKS*, tomando como referência de cargas, torque e potência de um motor padrão de um veículo Baja SAE. Os resultados de Tensões finais de cada módulo da simulação são apresentados e comparados com os limites de escoamento dos materiais presentes nos módulos.

PALAVRAS-CHAVE: CVT. Benchmarking. CAD. Simulação. Baja SAE.

ABSTRACT

MICHALAK. C. H., 2017. **VIRTUAL SIMULATION OF CVT TRANSMISSION SYSTEM BASED ON BENCHMARKING**. Course Completion Work (Bachelor of Mechanical Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Guarapuava, 2017.

The present work is the proposition of a transmission arrangement, based on already consolidated systems in the Mechanical Engineering. Due to the characteristics of the use of the motor torque and the simplicity of the system, a CVT (Continuously Variable Transmission) transmission was developed. By knowing the components applied in the general transmissions and the elements of the CVTs transmissions, the concept of Benchmarking was applied, which boils down to taking advantage of the best of each idea. The proposed model consists of two pairs of variator pulleys where one pair is connected to the motor shaft and the other pair is connected to a planetary system that transmits the final drive ratio. To simulate the system was used the computer software CAD (Computer Aided Design) SOLID WORKS, taking as reference of loads, torque and power of a standard engine of a vehicle Baja SAE. The results of final tensions of each simulation module are presented and compared to the Yield Strength of the materials present in the modules.

Keywords: CVT. Benchmarking. CAD. Simulation. Baja SAE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - CVT de polias variadoras.....	19
Figura 2 - Sistema CVT EXTROID da Nissan	20
Figura 3 - CVT por rolamento.....	21
Figura 4 - CVT de polias expansivas.....	22
Figura 5 - Mancais de rolamento.....	23
Figura 6 - Mancal de deslizamento	23
Figura 7 - Polia de face plana com abaulamento de borda	24
Figura 8 - Polia de perfil redondo	25
Figura 9 - Desenho de polia trapezoidal ou em "V"	25
Figura 10 - Conjunto de polias expansivas	26
Figura 11 - Correia metálica	28
Figura 12 - Diferencial de automóvel.....	36
Figura 13 - Polias variadoras propostas.....	37
Figura 14 - Eixos do sistema CVT	38
Figura 15 - Sistema planetário	38
Figura 16 - Sistema de transmissão CVT.....	39
Figura 17 - Montagem geral da transmissão.....	41
Figura 18 - Sub montagens da transmissão.....	42
Figura 19 - Elementos da sub montagem das polias motoras.....	43
Figura 20 - Elementos da sub montagem do sistema planetário.....	45
Figura 21 - Elementos da sub montagem das polias movidas	46
Figura 22 - Aplicação das cargas nas polias motoras	48
Figura 23 - Aplicação das cargas nas polias	48
Figura 24 - Aplicação das cargas no sistema planetário	49
Figura 25 - Aplicação das cargas na cruzeta	50
Figura 26 - Tensões na sub montagem das polias motoras.....	51
Figura 27 - Tensões na sub montagem das polias movidas	51
Figura 28 - Tensões na sub montagem do sistema planetário.....	52
Figura 29 - Tensões no eixo de saída	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - CVTs mais conhecidas no mercado atual	34
Quadro 2 - Propriedades dos materiais utilizados	47
Quadro 3 - Resultados da simulação	50
Quadro 4 - Resultados de deslocamento da simulação	54

LISTA DE ACRÔNIMOS

ASME	American Society of Mechanical Engineers
CAE	Computer Aided Engineering
CVT	Continuously Variable Transmission
ECU	Eletronic Control Unit Society
IVT	Infinite Variable Transmission
SAE	Society of Automotive Engineers

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1.	OBJETIVO GERAL	13
1.2.	OBEJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.3.	JUSTIFICATIVA.....	14
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1.	TRANSMISSÕES MECÂNICAS	15
2.2.	SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CVT	17
2.2.1.	Vantagens E Desvantagens Das Transmissões Cvts	17
2.2.2.	Princípio De Transmissão De Torque Das Cvts.....	18
2.2.3.	Cvt Com Polias Expansivas	19
2.2.4.	Toroidal	19
2.2.5.	Cvt Por Rolamento.....	20
2.3.	COMPONENTES DOS SISTEMAS CVT	21
2.3.1.	Eixos	21
2.3.2.	Mancais.....	22
2.3.3.	Polias	24
2.3.4.	Correias.....	26
2.4.	APLICAÇÕES DOS SISTEMAS CVT	28
2.4.1.	Aplicação Das Cvts Em Veículos	29
2.4.2.	Aplicação Das Cvts Em Máquinas	29
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1.	LEVANTAMENTO DAS TRANSMISSÕES CVT'S	31
3.2.	DISCRIMINAÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTITUENTES DO SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CVT	31
3.3.	PROPOSIÇÃO DE UM ARRANJO DE SISTEMA CVT.....	31
3.4.	DETALHAMENTO DOS ELEMENTOS DA CVT PROPOSTA ...	31
3.5.	MODELAGEM DA CVT EM SOFTWARE CAD.....	32
3.6.	SIMULAÇÃO VIRTUAL DA CVT.....	32
3.7.	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVEZ DA SIMULAÇÃO	33
4.	DESENVOLVIMENTO	34
4.1.	PROPOSIÇÃO DE ARRANJO DE CVT	35
4.2.	DETALHAMENTO DOS ELEMENTOS	37
4.2.1.	Polias Variadoras	37
4.2.2.	Eixos De Transmissão	37
4.2.3.	Sistema Planetário	38
4.2.4.	Carcaça E Mancais	39
4.3.	MODELAGEM EM CAD	39

4.3.1.	Montagem Geral Da Transmissão	39
4.3.2.	Sub Montagens Da Transmissão	42
4.4.	SIMULAÇÃO	46
4.4.1.	Modulo Das Polias Motoras	47
4.4.2.	Modulo Das Polias Movidas	48
4.4.3.	Modulo Do Sistema Planetário.....	49
4.4.4.	Modulo Do Eixo De Saída	49
4.5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
REFERÊNCIAS.....		56

1. INTRODUÇÃO

No atual cenário da indústria metal-mecânica busca-se atingir o melhor desempenho possível dos equipamentos. As razões para essa busca se dão principalmente pelos custos envolvidos, pela escassez energética e pelo grande apelo ambiental inserido nas atividades produtivas.

Neste contexto um dos principais sistemas mecânicos são as transmissões, elas são responsáveis por transmitir energia de um sistema para outro geralmente através de torque e rotação. As transmissões mecânicas são constituídas de engrenagens, buchas, mancais e outros elementos mecânicos, e sua eficiência está altamente ligada ao arranjo destes componentes. Dentre os mais diversos sistemas de transmissões, pode-se destacar as CVTs (Continuously Variable Transmission).

Transmissões por CVTs são caracterizadas como sistemas automatizados de variação de velocidade contínua, diferentemente das transmissões com marchas onde se tem a troca de relações através do conjunto de engrenagens. Os sistemas constituídos por CVTs são progressivos e suaves, além de mais eficientes por conseguirem utilizar o torque "ótimo" do motor, mantendo-o constante.

Hoje as CVTs estão inseridas nas mais diversas aplicações, principalmente no setor automobilístico. A viabilidade de seu uso se dá pela simplicidade do sistema, versatilidade e eficiência na transmissão de energia.

Com isto otimizar um sistema de transmissão por CVT, realizando um projeto de modelagem e simulação antes de sua fabricação é de grande importância, pois assim pode-se prever possíveis falhas, e buscar a melhor configuração para os elementos constituintes da transmissão.

1.1. OBJETIVO GERAL

Propor um mecanismo de transmissão CVT variável, baseado em *benchmarking* de sistemas disponíveis.

1.2. OBEJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar modelagem dos componentes da transmissão CVT proposta.
- Realizar montagem dos componentes em sistemas e sub sistemas.
- Executar simulação da transmissão modelada em uma aplicação hipotética utilizando-se cargas e velocidades características de seu uso.

1.3. JUSTIFICATIVA

Com a busca constante pela redução dos custos e melhoramento contínuo dos sistemas mecânicos, desenvolver artifícios para reduzir o tempo de realização de uma tarefa, ou ainda, otimizar o consumo de energia são maneiras de se atender a procura por eficiência nos tempos atuais.

As CVTs têm a versatilidade e funcionalidade para substituir transmissões convencionais em vários tipos de maquinários, possibilitando uma melhora na agilidade de execução das tarefas e no consumo energético.

A possibilidade de melhoramento e o grande potencial de aplicações das transmissões continuamente variáveis é a motivação deste trabalho para se buscar novos arranjos e ideias nesta classe de transmissões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. TRANSMISSÕES MECÂNICAS

Segundo Gott (1991) as transmissões mecânicas são elementos que têm por função transferir potência de um mecanismo a outro. Seu principal objetivo a transformação das variáveis de entrada da transmissão, torque e rotação, de modo a adequá-las ao tipo de trabalho ou solicitação requisitada no sistema. A relação de transmissão pode ser fixa, variada, ou ainda variada continuamente.

No setor automotivo a transmissão está associada ao trem de força, sistema que é comumente composto por motor, transmissão e semieixos. Este conjunto é responsável pela movimentação do veículo dando-lhe energia cinética e velocidade. O trem de força necessita de um aparato que faça as alterações de torque e velocidade ou seja um mecanismo que altere a relação de transferência conforme o sistema é solicitado (GOTT, 1991).

De maneira simplificada pode-se classificar os sistemas de transmissão veiculares atuais da seguinte forma (GOTT, 1991; BOSCH, 2004; FORTI, 2003):

1) Quanto ao princípio de transmissão do torque:

- Por meio de engrenagens: Estes sistemas são normalmente robustos e confiáveis, geralmente dimensionados para atingir vida prolongada e ter baixo custo de produção;

- Sistemas de fricção: são sistemas compostos por elementos flexíveis e polias, geralmente aplicados onde não se necessita torque elevado como veículos pequenos e ciclomotores;

- Transmissões por tração: sistemas que necessitam de materiais nobres e lubrificantes de alto desempenho. Precisão na fabricação é indispensável o que leva a um alto custo relativo;

- Transmissões Hidrostáticas: utilizam-se de uma bomba de vazão variável e um motor hidráulico de capacidade volumétrica variável. O motor e a bomba são

acoplados a um sistema de engrenagens planetárias para desenvolver as relações de transmissão

2) Quanto a relação de transmissão:

- Relação única: não existe alteração na relação de transmissão, presente em caixas redutoras, as engrenagens e suas posições se mantêm fixas e a relação permanece constante;

- Relação escalonada: a relação de transmissão é alterada pela troca relativa de posição das engrenagens, comumente utilizada em câmbios veiculares manuais, este tipo de sistema necessita de grupos de engrenagens para desenvolver as relações de transmissão;

- Relação continuamente variável: Neste sistema existe uma relação de transmissão máxima e uma relação de transmissão mínima que são determinadas pelas configurações dos elementos do sistema. Entre os pontos de máximo e mínimo a relação pode ser infinitamente variada. Destacam-se as CVTs e IVTs (Infinite Variable Transmission) que se diferem, pelo fato das IVTs conseguirem uma rotação de saída nula com uma rotação de entrada na transmissão não nula.

3) Quanto ao modo de alteração das relações de transmissão no sistema:

- Acionamento manual: nesse sistema necessita-se de grande interação entre humano e máquina. Diversos dispositivos devem ser acionados com o esforço do operador, como embreagem e alavanca de marcha. A condução está totalmente ligada ao modo que o operador realiza as trocas de relação. É amplamente utilizado porem está perdendo espaço para os câmbios automáticos e automatizados devido ao conforto e praticidade de utilização (DIAS, 2011).

- Semiautomático ou Automatizado: é um sistema com arquitetura semelhante ao câmbio manual, mas que contem atuadores responsáveis pelo acionamento dos dispositivos de troca de relação. O câmbio automatizado diminui os esforços para a condução do veículo porem ainda é o operador que determina o momento de troca das relações.

- Automático: é por definição um tipo de cambio que encontra a relação ideal de transmissão, dependendo das variáveis de condução como velocidade e carga. Atualmente este tipo de câmbio é altamente dependente de atuadores e sistemas

eletrônicos. Um módulo programável, chamado de unidade de controle eletrônico, recebe parâmetros de condução como velocidade e posição do pedal do acelerador, e estipula a melhor relação de transmissão.

2.2. SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CVT

Diferente dos câmbios automáticos convencionais, as CVTs não possuem um número certo de marchas, mas sim uma faixa de variação da relação de transmissão. A variação na relação de transmissão se dá de forma contínua não existindo degraus ou mudanças abruptas nas relações de transmissão (NISSAN GLOBAL EXTROID CVT, 1999).

2.2.1. Vantagens e Desvantagens das transmissões CVTs

As CVTs possuem várias vantagens quando comparadas aos câmbios manuais e automáticos convencionais, veículos equipados com esse tipo de transmissão têm ótima dirigibilidade, maior conforto e eficiência no consumo de combustível.

Com uma operação simples a CVT possui uma dirigibilidade notável visto que é apenas necessário selecionar o sentido de condução utilizar o pedal do acelerador para a movimentação do veículo. A relação de transmissão é automaticamente selecionada pelo sistema mecanicamente, através de embreagens centrífugas, ou eletronicamente, com atuadores controlados por uma central (LUK, 1994).

As CVTs são mais lineares que outros tipos de câmbio por manter constante a transmissão de torque do motor, diferente dos câmbios automáticos e manuais, onde se tem alternância entre aplicação de torque e troca de marcha.

Na questão da eficiência energética as CVTs destacam-se por conseguirem utilizar o torque ótimo do motor, ou seja, transmitem potência do motor em uma rotação de maior rendimento aumentando assim a autonomia dos veículos equipados com este tipo de transmissão (GOTT, 1991).

As transmissões CVT não podem ser usadas em automóveis de alta potência, pois, pode ocorrer deslizamento da correia. O torque limite para a utilização em automóveis é de 35 kgf.m (ENGENHARIA DO MOVIMENTO 2014).

Alguns tipos de CVT, os modelos de correia metálica, utilizam para a lubrificação da transmissão óleos de alta performance, o que acaba aumentando o custo na manutenção (ENGENHARIA DO MOVIMENTO 2014).

Na questão da dirigibilidade os câmbios CVT têm a desvantagem de não se perceber mudança na rotação do motor, exceto até que se atinja o torque máximo, o que, para algumas pessoas, pode tornar a direção um tanto monótona (ENGENHARIA DO MOVIMENTO 2014).

2.2.2. Princípio de Transmissão de Torque das CVTs

Segundo Gott (1991) os princípios de transmissão de torque das CVTs são fricção e tração. A distinção do princípio de atuação se dá pela análise dos fenômenos nas interfaces dos elementos moveis do sistema, assim as CVTs que operam a seco são denominadas de fricção, as CVTs que operam por tração necessitam de um fluido com características especiais para que se transmita movimento evitando o contato direto entre os elementos.

As CVTs por fricção, não funcionam sem que haja atrito entre os componentes, portanto deve-se analisar o sistema como um todo, buscando o atrito ótimo de trabalho colocando em equilíbrio a transmissão do torque e a eficiência. (SHIGLEY, 2004; COLLINS, 2006).

Nos sistemas que operam pelo princípio de tração se faz necessário a utilização de um fluido lubrificante, nota-se que a transmissão nesse tipo de sistema não se dá por contato direto entre as faces metálicas dos componentes e sim pela interação hidrodinâmica devido à viscosidade do lubrificante. Convenientemente a viscosidade destes fluidos tem maior valor quando submetidos a altas pressões (NISSAN GLOBAL, EXTROID CVT, 1999).

2.2.3. CVT com Polias Expansivas

A CVT com polias expansivas possui um projeto simples e eficiente que se utiliza de uma correia e duas polias bipartidas onde ocorre o deslocamento axial das partes da polia de modo a alterar o raio de contato efetivo, desta maneira enquanto uma polia se fecha a outra se abre variando a relação de transmissão dentro de uma faixa específica. A Figura 1 mostra dois modos de operação da CVT: (a) em relação de transmissão mínima e (b) e em relação de transmissão máxima.

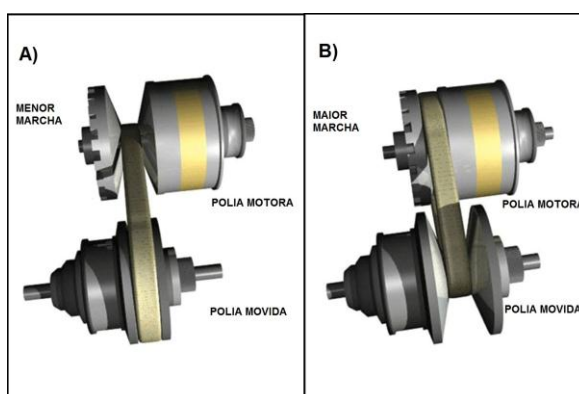


Figura 1- CVT de polias variadoras
 Relação de transmissão mínima (a) Relação de transmissão máxima
 Fonte: Howstuffworks, 2005.

A relação de transmissão deste tipo de CVT pode ser infinitamente variada entre a relação mínima e a relação máxima de transmissão.

2.2.4. Toroidal

De acordo com Nissan (1999), um sistema toroidal é basicamente composto por dois discos que se confrontam axialmente e dois rolamentos que variam a posição de contato com os discos. Esse tipo de CVT possui a capacidade de transmissão de torques da ordem de 40 kgf/m.

O princípio de seu funcionamento é por tração, portanto se faz necessário a utilização de um fluido. Este fluido tem função de transmitir o torque entre os elementos e reduzir o contato direto.

Em razão da alta pressão entre os elementos moveis deste tipo de transmissão ocorre aquecimento local e, em consequência, a viscosidade do fluido varia consideravelmente. Devido a essas mudanças de temperatura se faz necessário a utilização de lubrificantes de alto desempenho (NISSAN GLOBAL; EXTROID CVT, 1999).

Como a capacidade de tração entre os elementos está intimamente ligada a viscosidade do fluido, o funcionamento correto deste tipo de transmissão é altamente dependente da faixa de temperatura de operação do veículo. A Figura 2 mostra um esquema da transmissão EXTROID Nissan.

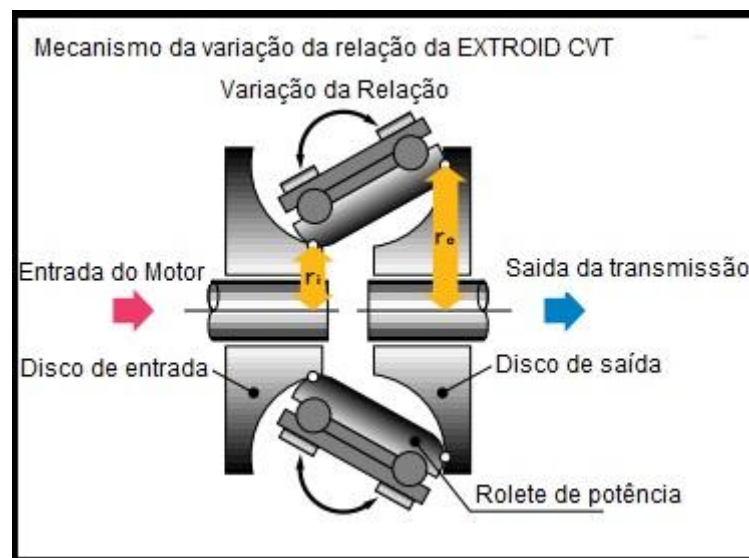


Figura 2 - Sistema CVT EXTROID da Nissan
Fonte: NISSAN GLOBAL, EXTROID CVT

2.2.5. CVT por Rolamento

De acordo com Akehurst (2006), no sistema CVT por rolamento a transmissão de torque é obtida pelo contato entre dois anéis e esferas intermediárias. Uma das formas construtivas deste modelo de transmissão é a CVT Milner. Nesse sistema a variação da relação acontece à medida que é variada a posição radial das esferas. Ao aproximar-se as duas metades da pista do eixo motriz, as esferas deslocam-se tendo um raio de contato maior com o disco movido. Ao afastar-se as metades da pista do eixo motriz a relação de transmissão diminui devido ao menor raio de contato entre a esfera e o disco movido. Desta forma

alterando o raio de contato entre a esfera e os discos motriz e movido realiza-se a variação da relação de transmissão. A Figura 3 representa um modelo básico de CVT por rolamento.

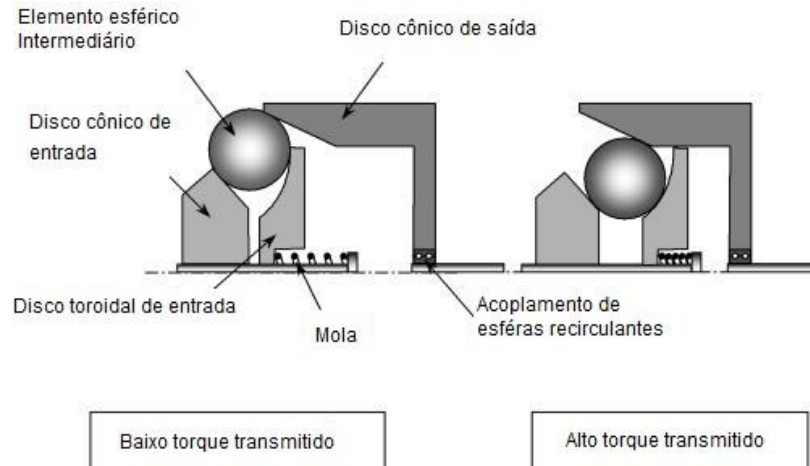


Figura 3 - CVT por rolamento
Fonte: ASME (American Society of Mechanical Engineers)

2.3. COMPONENTES DOS SISTEMAS CVT

O número de componentes de uma transmissão está totalmente ligado à arquitetura do sistema. Enquanto em transmissões manuais existem várias engrenagens, eixos, garfos e acoplamentos em uma transmissão hidrostática o sistema é composto por bomba, motor hidráulico e sistema planetário (GOTT, 1991).

A simplicidade dos sistemas CVT é de fato devido ao emprego de elementos mecânicos simples. Uma CVT de polias expansivas é basicamente composta por mancais, eixos, correia e sistema de polias.

2.3.1. Eixos

Segundo Shigley (2004) eixos são membros rotativos comumente de seção transversal circular utilizados para transmitir potência e movimento. Cabe ao eixo estabelecer a linha de centro de rotação, ou oscilação, de elementos como engrenagens, polias, volantes, manivelas, rodas dentadas e similares, bem como

controlar a geometria de seus movimentos. Um eixo também pode ser fixo tendo dessa forma apenas função de suporte e não transmissão de potência.

Nas transmissões CVT os eixos têm papel fundamental pois é a partir deles que a potência chega a transmissão e também é transmitida da transmissão para a carga. A Figura 4 apresenta a posição do eixo em uma CVT de polias expansivas.

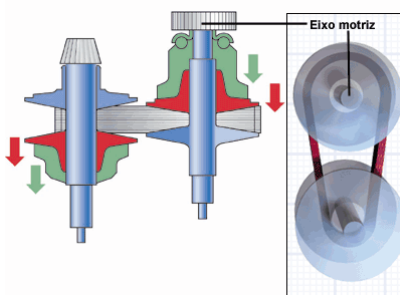


Figura 4 - CVT de polias expansivas
Fonte: www.fem.unicamp.br

2.3.2. Mancais

Segundo Juvinal (2006) a principal função dos mancais é dar sustentação a elementos moveis de sistemas mecânicos, sendo capazes de suportar as cargas envolvidas nos processos de transmissão de movimento e potência. A classificação dos mancais é geralmente feita pela interação dos elementos rotativos e os elementos estáticos que compõem o mancal.

1) Mancais de contato rolante: o termo mancal de contato de rolamento ou de antifricção são todos usados para descrever a classe de mancal em que a carga principal é transferida por meio de elementos em contato rolante, em vez de escorregamento. Em um mancal de rolamento, a fricção inicial é cerca de duas vezes a fricção de funcionamento, ainda que seja insignificante em comparação com a fricção inicial de um mancal deslizante. Carga, velocidade e viscosidade de operação do lubrificante afetam as características friccionais de um mancal de rolamento (SHIGLEY, 2004).

Segundo Shigley (2004), esse tipo de mancal é fabricado para receber cargas radiais, cargas de empuxo, ou a combinação desses dois gêneros de cargas. A classificação dos mancais de rolamento depende do tipo de elemento rolante, esfera ou rolo, e de como se estabelece o contato entre a parte rolante e as pistas

do rolamento. A Figura 5 mostra alguns modelos de mancais de esfera (a) e de rolos (b).

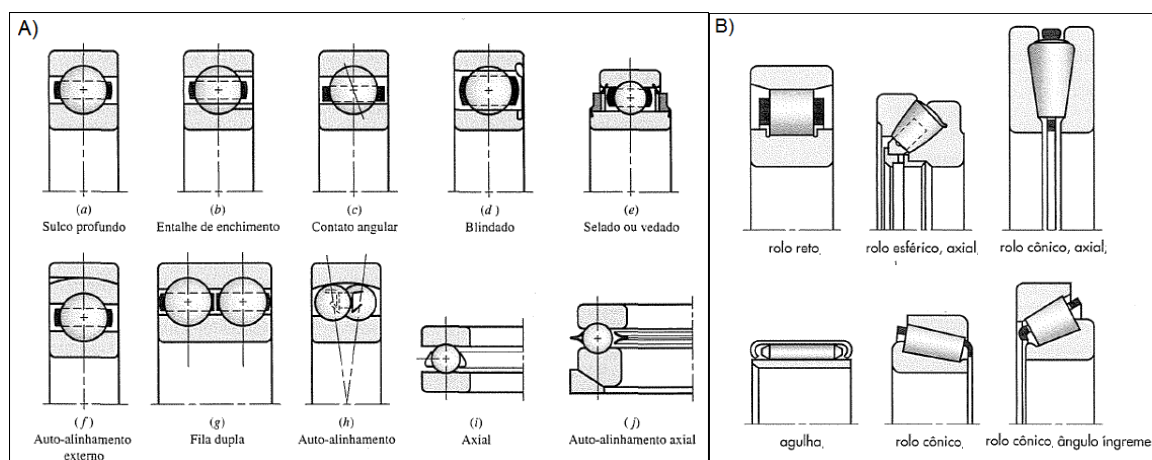


Figura 5 - Mancais de rolamento
(a) mancais de rolamento de esfera **(b) mancais de rolamento por rolos**
Fonte: Shingley, 2004

2) Mancais de escorregamento ou deslizamento: de acordo com Casteletti (2012), os mancais de deslizamento são elementos que têm função de dar apoio à um eixo rotativo, estando sujeito a atrito devido ao contato direto entre a superfície do eixo e do mancal. Esse tipo de mancal é constituído de uma bucha fixada à carcaça do mancal. Geralmente são utilizados em máquinas que operam em baixa rotação para uma vida útil maior, visto que alta rotação implica em um maior aquecimento que diminui a vida do componente. A Figura 6 mostra um mancal de deslizamento e as partes que o compõem.

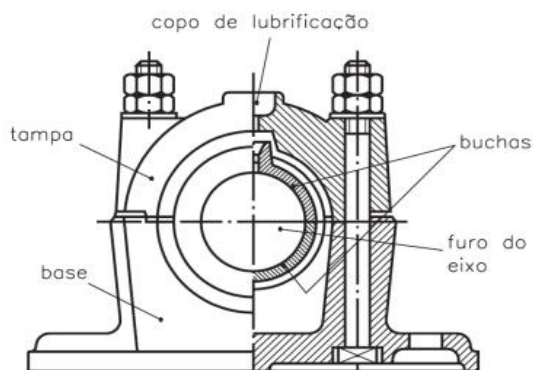


Figura 6 - Mancal de deslizamento
Fonte: offset3blog.wordpress.com

2.3.3. Polias

Segundo Mademil (2015) polia ou roldana, consta de um disco que pode girar em torno de um eixo que passa por seu centro. Além disso, na periferia desse disco existe um sulco, denominado gola, dentro da qual trabalha uma correia de transmissão de movimento. O perfil da gola vai depender do tipo de correia que é empregada a polia podendo ser plana, cilíndrica, trapezoidal ou, podendo ainda, ser utilizada uma corrente. Os tipos de polia são determinados pela forma da superfície na qual a correia se assenta.

A utilização das polias é muito ampla nas várias áreas da mecânica estando presentes em máquinas de usinagem, implementos agrícolas, redutores de velocidade e uma infinidade de equipamentos.

1) Polias de face plana: as polias de face retas caracterizam-se por possuírem a gola ou perfil onde a correia percorre de geometria plana. Podem ainda conter um leve abaulamento que tem função de melhorar o alinhamento da correia em trabalho. As polias puramente retas conservam melhor as correias se comparadas com as abauladas (CASTELETTI, 2012). Uma polia de face plana com abaulamento é representada pela Figura 7.



Figura 7 - Polia de face plana com abaulamento de borda
Fonte: www.geocities.ws

2) Polia de face cilíndrica: caracterizadas por possuírem um perfil de gola cilíndrico esse modelo de polia é utilizado para a movimentação de cabos de aço e correias redondas. Este tipo de polia também é conhecido como roldana e são amplamente utilizadas em talhas de elevação, guindastes e outros dispositivos que

usam cabos ou cordas (MADEMIL, 2015). A Figura 8 representa uma polia de perfil redondo.

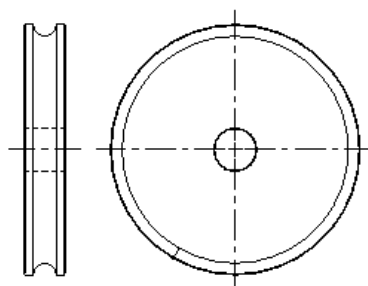


Figura 8 - Polia de perfil redondo
Fonte: conklinmanufacturing.com

3) Polia de perfil trapezoidal: as polias de perfil trapezoidal também são conhecidas como polias de perfil em V, devido ao formato do sulco ou da gola da polia. Esse tipo de polia tem muitas aplicações e seu uso está consolidado devido a confiabilidade e versatilidade, bem como pela facilidade de se encontrar peças padronizadas no mercado. Esse tipo de polia pode ser composto de apenas um sulco, ou ainda, ser fabricada com múltiplos sulcos sendo então chamada de polia V múltipla (MADEMIL, 2015). A Figura 9 mostra um perfil de polia trapezoidal.

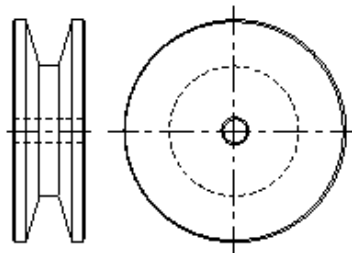


Figura 9 - Desenho de polia trapezoidal ou em "V"
Fonte: conklinmanufacturing.com

4) Polias expansivas: segundo Albuquerque (2003), as polias expansivas foram desenvolvidas devido a necessidade de um elemento com a capacidade alterar seu diâmetro efetivo, fazendo assim com que a velocidade percorrida pela polia pudesse ser alterada e possibilitando a alteração da relação de transmissão no sistema.

Também conhecidas como polias de diâmetro variável, as polias expansivas, são o “coração” de uma CVT. Cada polia geralmente é composta por dois cones, ambos com angulação de vinte graus e entre esses dois cones é posicionada uma correia, sendo as correias em V as mais utilizadas nessa aplicação (NISSAN, 1992).

De acordo com Gott (1991) o funcionamento de uma polia expansiva é extremamente simples, quando os dois cones estão afastados, a correia é posicionada em um raio de contato menor, percorrendo assim um perímetro reduzido a cada revolução, com isso se reduz a relação de transmissão. Quando os cones se aproximam um do outro o raio de contato entre a polia e a correia aumenta, fazendo com que a correia percorra um perímetro maior a cada revolução, aumentando a relação de transmissão. É importante observar que esse aumento na relação de transmissão pode ser controlado por meio de um dispositivo centrífugo o que torna a condução progressiva e eficiente visto que se pode manter a rotação do motor constante. A Figura 10 representa um tipo de CVT por polias expansivas.

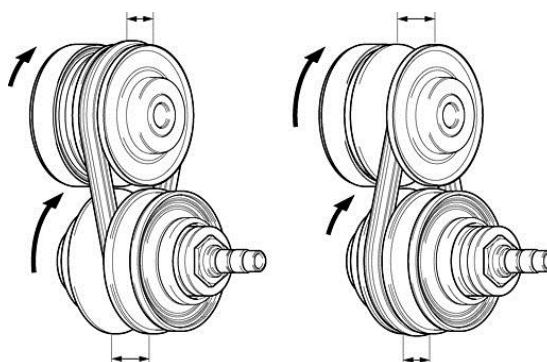


Figura 10 - Conjunto de polias expansivas
Fonte: SAE internacional

2.3.4. Correias

Correias, correntes e outros elementos similares, elásticos ou flexíveis, são usados em sistemas de transporte e transmissão de potência. Com frequência esses elementos podem ser utilizados para substituir sistemas rígidos de transmissão. Em muitos casos seu uso simplifica o projeto de uma máquina e reduz substancialmente o seu custo (SHIGLEY,2004).

Além disso, tais elementos por serem elásticos e normalmente longos permitem com que haja uma absorção de cargas, choque e amortecimento, isolando os efeitos da vibração. Essa é uma vantagem importante para a vida útil do maquinário (SHIGLEY,2004).

Nota-se que a maioria dos elementos flexíveis não dispõe de uma vida útil considerada infinita. Portanto ao se utilizar este tipo de elemento é importante estabelecer um programa de inspeção, a fim de protegê-los contra o desgaste, envelhecimento e perda de elasticidade. Tais elementos devem ser trocados ao primeiro sinal de deterioração (SHIGLEY,2004).

Segundo Shigley (2004) as correias podem ser classificadas quando a forma de sua secção transversal, sendo as mais comuns as planas, redondas, trapezoidais ou em V e as sincronizadoras.

As correias são geralmente formadas de materiais compósitos contendo uma matriz polimérica e um tipo de fibra resistente ou ainda em muitos casos fios de aço.

1) Correias em V: de acordo com Norton (2004), as correias de transmissão de potência têm a função de transmitir força e movimento entre uma polia motriz e outra polia movida. Sua configuração em V aumenta a força de atrito evitando assim o deslizamento que é desfavorável nas transmissões por correia.

“As dimensões transversais das correias em V foram padronizadas pelos fabricantes, com cada secção designada por uma letra do alfabeto para tamanhos em dimensões de polegada. Os tamanhos em metro são designados por números.[...]. As dimensões, os diâmetros mínimos de polia acanalada e os intervalos de potência para cada uma das secções com letras estão listados em tabelas. Para especificar uma correia em V, dê a letra da secção, seguida pela circunferência interna em polegadas. Por exemplo, B75 é uma correia de secção B com uma circunferência interna de 75 in” (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2004, p. 834).

Segundo GOTT (1991) as correias em V são as mais utilizadas nas CVTs de polias expansivas, nesse tipo de transmissão elas podem ser confeccionadas tanto em borracha quanto em metal dependendo da aplicação e o torque requerido na transmissão.

2) Correias metálicas: um dos maiores avanços nas transmissões CVT foi o desenvolvimento de correias metálicas para a transmissão de potência. Com características de flexibilidade, alta dureza e resistência conseguiu-se atingir torques mis elevados em comparação com os torques transmitidos pelas CVTs de correias convencionais (GOTT, 1991).

Confeccionadas em várias peças de aço com um perfil fino, envolvidas por um laço também metálico, esse modelo de correia garantiu alta durabilidade e confiabilidade às CVTs pois com essa configuração consegue-se uma redução no deslizamento entre correia e polia (NISSAN GLOBAL, EXTROID CVT, 1999). A Figura 10 representa os componentes de um tipo de correia metálica.

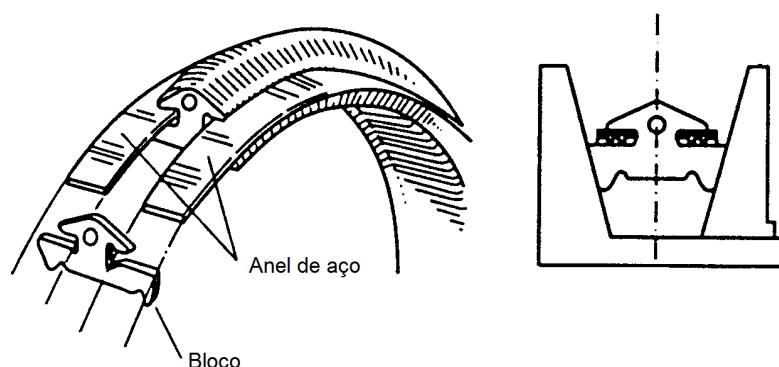


Figura 11 - Correia metálica
Fonte: ASME 2006

2.4. APLICAÇÕES DOS SISTEMAS CVT

De acordo com Albuquerque (2003) a primeira CVT foi construída por Gottlieb Daimler em 1886, porem somente foi utilizada em veículos no século seguinte com a evolução dos materiais e das técnicas de fabricação.

Visto o grande potencial de aplicação como variador de velocidade em veículos, prometendo uma economia de energia e um menor custo de produção comparado as transmissões convencionais, as CVTs chamarão a atenção para o segmento automobilístico.

2.4.1. Aplicação das CVTs em veículos

A primeira CVT de polias expansivas aplicadas a um veículo foi comercializada pela empresa *Doorne Aanhangwargen Fabriek*, no ano de 1958, ela equipava um automóvel de pequeno porte, um sedã, o DAF 600 (ALBUQUERQUE, 2003).

Em tempos anteriores as CVTs já eram utilizadas em aplicações industriais como tornos e fresadoras. Com a introdução de materiais mais resistentes e modernos nas correias e a uma eletrônica embarcada conseguiu-se adequar a utilização das CVTs nos automóveis trazendo resultados satisfatórios.

Desde o lançamento do DAF 600 em 1958, muito conhecimento foi adquirido pelos fabricantes neste ramo de transmissões, até que em 1991 a Nissan lançou sua inovadora transmissão, a *Hypertronic*. Utilizando uma correia de transmissão em aço de elevada resistência e comando hidráulico no sistema de polias, tinha capacidade de comportar o torque de um motor de dois litros.

Hoje muitas montadoras vêm utilizando essa tecnologia para equipar seus automóveis destacando-se a Nissan, Mercedes-Benz, Audi e Honda (ALBUQUERQUE, 2003).

2.4.2. Aplicação das CVTs em Máquinas

Na década de 50 iniciou-se a utilização de sistemas CVT em máquinas agrícolas, principalmente em colheitadeiras. As CVTs eram responsáveis pela movimentação do implemento e também eram aplicadas ao sistema mecânico de trilha dos grãos (HAMEER, 2009).

Encontradas em tratores cortadores de grama, tornos, fresas e muitas outras máquinas as CVTs ganham cada vez mais espaço no ramo de transmissões. Devido a simplicidade seus componentes e o baixo custo de fabricação as CVTs de polias variadoras são a solução para aplicações de baixo valor agregado (ALBUQUERQUE, 2003).

Hoje máquinas agrícolas como tratores e colheitadeiras utilizam esta tecnologia que traz melhores rendimentos comparados aos modelos de

transmissões convencionais. CASE-IH, uma grande empresa no ramo de implementos agrícolas, dispõe de tratores e colheitadeiras que possuem transmissões CVT. A empresa afirma que seus produtos que utilizam CVT consomem cerca de 20% menos combustível que os produtos que não operam com essa tecnologia (CASEIH 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. LEVANTAMENTO DAS TRANSMISSÕES CVT'S

Esta atividade foi desenvolvida a fim de se levantar os principais tipos de CVT disponíveis no mercado. Estes sistemas foram comparados, confrontando suas características e peculiaridades, realizando um *Benchmarking*.

3.2. DISCRIMINAÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTITUENTES DO SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CVT

A partir da pesquisa em torno dos tipos de CVT's disponíveis no mercado e dos resultados do *Bechmarking*, foi realizada a discriminação dos elementos principais presentes nos sistemas de transmissão por CVT.

3.3. PROPOSIÇÃO DE UM ARRANJO DE SISTEMA CVT

Com os principais elementos de interesse discriminados, foi proposta uma arquitetura de transmissão CVT. A seleção dos elementos que compõem este sistema levou em conta um bom custo benefício, simplicidade de funcionamento, baixo custo de manutenção e facilidade de fornecimento de peças.

3.4. DETALHAMENTO DOS ELEMENTOS DA CVT PROPOSTA

Com a seleção dos elementos definida, os componentes foram detalhados e descrito. Possíveis alterações em material, geometria e outras características foram propostas e executadas nesta etapa, de modo a otimizar o projeto da CVT.

3.5. MODELAGEM DA CVT EM SOFTWARE CAD

Com a fase de detalhamento dos elementos da CVT concluída, foi realizada a modelagem em *Software CAD (Computer Aided Design)*. A modelagem utilizou elementos padronizados como rolamentos, travas, parafusos e outros. Componentes não encontrados através do *Benchmarking* e foram padronizados e projetados de maneira a atender as características desejadas no sistema CVT.

Os rolamentos utilizados no sistema planetário foram de esferas radiais de numeração 0440, para eixo de 40mm, pista externa de 110mm e largura de 27mm. Para o mancal do sistema planetário utilizou-se os rolamentos de numeração 17180, para eixos de 180mm, pista externa de 215mm e largura de 18mm.

A transmissão foi dividida em 4 módulos e uma carcaça, módulo das polias motoras, módulo das polias movidas, módulo do sistema planetário e módulo do eixo de saída. Para os módulos das polias motoras e movidas foi utilizado o material ferro fundido maleável. No módulo do sistema planetário aplicou-se aço 4340 como material. O eixo de saída foi simulado com o material aço 1020.

Como variáveis de entrada tomou-se valores de torque e potência do motor aplicado ao Formula Baja SAE, neste caso potência de 10 cavalos e um torque máximo de 18 N.m.

3.6. SIMULAÇÃO VIRTUAL DA CVT

A partir da modelagem dos elementos da CVT realizada, executou-se uma montagem do conjunto. Com o sistema proposto montado, efetuou-se a aplicação hipotética de funcionamento da transmissão CVT. Nesta fase foram aplicados torques nos módulos da transmissão e executado um estudo estático na interface de simulação do solidworks.

O primeiro módulo simulado foi o módulo das polias motoras. Como entradas utilizou-se o torque máximo do motor do Formula Baja SAE cerca de 18 N.m.

O segundo módulo simulado foi o módulo das polias movidas. Os valores de saída do módulo das polias motoras foram utilizados como entradas para esse

modulo. Nesse caso um torque de 4.5N.m foi aplicado a polia externa das polias movidas e 72N.m foi aplicado a polia interna das polias movidas.

Para o sistema planetário aplicou-se os torques de saída do modulo das polias movidas, 4,5N.m para a engrenagem de entrada do sistema planetário e 72N.m para a carcaça do sistema planetário.




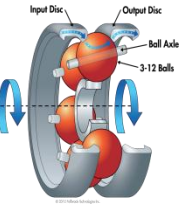
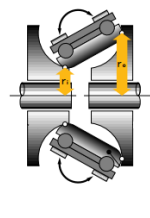
No último módulo, do eixo de saída, o torque máximo desenvolvido pela transmissão foi aplicado. 144N.m é o torque de saída do sistema planetário e foi aplicado ao eixo de saída.

3.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVEZ DA SIMULAÇÃO

Com a realização da simulação virtual, avaliou-se a viabilidade do sistema CVT proposto. Esta etapa objetiva verificar a efetividade do conjunto e compará-los com dados disponíveis de sistema presentes no mercado.

4. DESENVOLVIMENTO

O levantamento das transmissões CVT de maior relevância no mercado atual bem como a discriminação de seus principais componentes estão presentes na Tabela 1. De acordo com os fabricantes de cada uma das CVTs foram listadas suas vantagens, e comparando-as conjuntamente levantou-se as desvantagens. O quadro 1 representa as transmissões CVT mais consolidadas.

CVT	Nissan Xtronic	Honda CVT	ZF	NuVinci	Nissan Extroid
VANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> -Suporta altos valores de torque. -Acelerações rápidas. -Modo de direção esportivo. -Forma construtiva simples. 	<ul style="list-style-type: none"> -Máximo aproveitamento da potência e do torque do motor. -Economia de combustível e conforto. -Desempenho suave e uniforme. 	<ul style="list-style-type: none"> -Melhor utilização da potência do motor. -Máximo de produtividade. -Comporta potência de até 650 cv. 	<ul style="list-style-type: none"> -Grande potencial de aplicações. -Ótimo desempenho de transmissão e flexibilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> -Suporta altos valores de torque. -Alta durabilidade. -Alto rendimento.
DESVANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> -Necessita de lubrificantes especiais. -Valor de torque limitado. -Eficiência atrelada aos componentes hidráulicos 	<ul style="list-style-type: none"> -Lubrificantes especiais. -Valor de torque limitado. -Eficiência atrelada aos componentes hidráulicos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Redução da eficiência devido ao sistema hidráulico. -Alta complexidade. -Grande número de componentes. 	<ul style="list-style-type: none"> -Transmite baixos valores de torque. 	<ul style="list-style-type: none"> -Necessita de materiais especiais para sua construção. -Lubrificantes não convencionais. -Sistema complexo.
CONFIGURAÇÃO BÁSICA	<ul style="list-style-type: none"> -Polias variadoras. -Correia Metálica. -Sistema planetário. -Bomba Hidráulica -Atuador hidráulico. -Engrenagens. -Mancais. 	<ul style="list-style-type: none"> -Conversor de torque. -Polias variadoras. -Correia Metálica. -Sistema planetário -Bomba Hidráulica -Atuador Hidráulico. -Engrenagens. -Mancais. 	<ul style="list-style-type: none"> -Sistemas planetários. -Pacotes de disco (embreagens multidisco). -Bomba Hidráulica -Motor Hidráulico. -Engrenagens. -Mancais. 	<ul style="list-style-type: none"> -Anéis internos e externos. -Esferas planetárias. -Sistema de comando. -Mancais. 	<ul style="list-style-type: none"> -Discos toroidais. -Sistema planetário. -Bomba Hidráulica. -Atuador Hidráulico. -Mancais.
APLICAÇÕES	Automóveis.	Automóveis.	Maquinas agrícolas, caminhões.	Bicicletas, veículos elétricos.	Automóveis.
ESQUEMA CONSTRUTIVO					

Quadro 1 - CVTs mais conhecidas no mercado atual

Fonte: Autoria própria

4.1. PROPOSIÇÃO DE ARRANJO DE CVT

No atual cenário dos sistemas CVTs os mais encontrados são os de polias variadoras. Sua construção simples e sua alta variedade de aplicações são grandes vantagens deste modelo de CVT. Facilidade de manutenções, grande número de fornecedores de peças as consolidam neste ramo de transmissões (ENGENHARIA DO MOVIMENTO, 2014), por isso a proposta do arranjo de sistema CVT partiu do modelo de polias variadoras.

Com o tipo de sistema CVT selecionado (de polias variadoras), parte-se para a determinação do elemento flexível de transmissão, podendo o mesmo ser por correias ou correntes. As correias são mais baratas e não necessitam de lubrificação, porém têm vida útil baixa se comparadas as correntes. Já as correntes por sua vez precisam de lubrificação, possuem construção complexa, tornando-se mais caras e difíceis de serem encontradas. Para esse projeto optou-se pela utilização de duas correias para trabalhar em conjunto com as 4 polias variadoras presentes na CVT proposta.

Para o acoplamento das polias variadoras optou-se pela utilização de um sistema de engrenagens planetárias. Este tem a função de receber as variações de relação das polias expansivas e transformá-las em relações de transmissão finais. Como o sistema permite a variação da velocidade em dois sentidos, pode ser classificado como um sistema IVT (*Infinite variable transmission*). A forma do sistema planetário é semelhante à uma caixa satélite de um diferencial automobilístico, contendo quatro planetárias inseridas em uma geometria esférica. A Figura 12 representa uma caixa satélite de um automóvel.

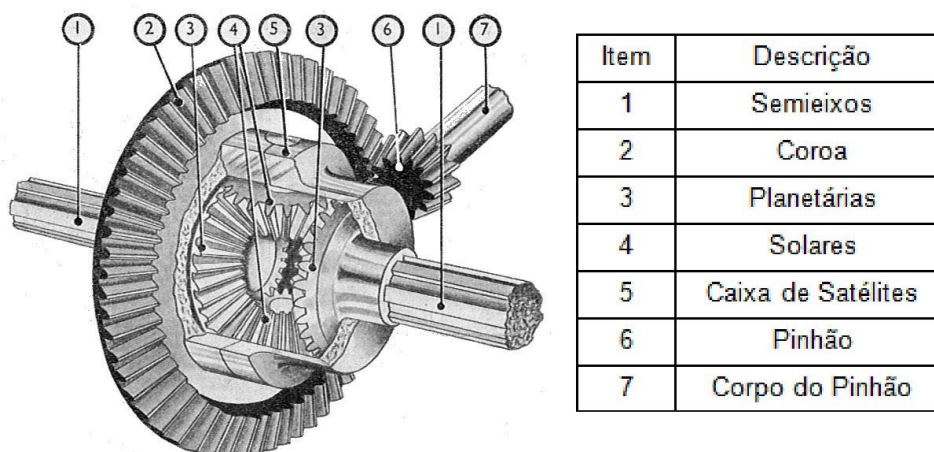


Figura 12 - Diferencial de automóvel

Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_\(mechanical_device\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_(mechanical_device))

Para a fixação dos elementos e para sustentação do sistema, desenvolve-se uma "caixa" onde os mesmos serão inseridos. Rolamentos comerciais 0440 e 17180 foram utilizados para dar liberdade de rotação aos elementos do sistema.

O princípio de funcionamento segue a seguinte forma: O sistema planetário apresenta duas entradas e uma saída, uma das entradas é a carcaça do sistema planetário e a outra entrada um eixo ligado à uma engrenagem planetária. Estas duas entradas são acopladas cada uma à sua respectiva polia variadora movida. A saída do sistema planetário é um eixo ligado a engrenagem planetária oposta a engrenagem de entrada.

As polias variadoras trabalham de forma que enquanto uma estará em diâmetro de contato maior a outra estará em diâmetro de contato menor, ou seja, enquanto uma se fecha a outra se abre e vice-versa. Esta lógica vale tanto para as polias motoras quanto para as polias movidas. Lembrando que tanto no eixo do motor quanto nos eixos movidos existem dois conjuntos de polias expansivas.

Com a variação das polias expansivas transmitidas ao sistema planetário desenvolve-se as relações de transmissão, bem como a velocidade nula no eixo de saída com determinada posição das polias variadoras.

4.2. DETALHAMENTO DOS ELEMENTOS

Os subsistemas que constituem a CVT proposta são: polias variadoras (motoras e movidas), eixos de transmissão, sistema planetário, mancais, elementos fixadores e carcaça.

4.2.1. Polias Variadoras

As polias variadoras do sistema de CVT proposto são semelhantes as existentes nas transmissões convencionais, diferindo que são utilizadas aos pares, de maneira que enquanto uma se desloca no sentido de menor diâmetro a outra se desloca no sentido de maior diâmetro e vice-versa. As polias do eixo movido, acopladas ao sistema planetário, tem liberdade de movimento uma em relação a outra. As polias do eixo motor apresentam mesma velocidade angular, travadas radialmente, apresentando movimento axial para a variação do diâmetro efetivo. A Figura 13 representa o sistema de polias variadoras.



Figura 13 - Polias variadoras propostas
Fonte: Autoria própria

4.2.2. Eixos de Transmissão

No sistema CVT proposto estão presentes três eixos, sendo eles: eixo motor, eixo movido e eixo de saída. O eixo motor é acoplado à fonte de potência, que pode ser um motor a combustão ou motor elétrico, esse transmitirá potência através das polias ao eixo movido. O eixo movido receberá o torque e rotação do eixo motor e transmitira para o sistema planetário. O eixo de saída é acoplado à

planetária de saída do sistema planetário. A Figura 14 representa os três eixos acoplados às polias e planetárias.

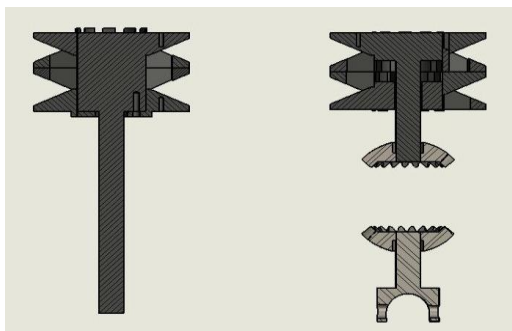


Figura 14 - Eixos do sistema CVT
Fonte: Autoria própria

4.2.3. Sistema Planetário

Composto por duas metades cilíndricas, com parte interna esférica, e quatro planetárias o sistema planetário recebe potência do eixo movido de modo que uma polia variadora movida transmitirá sua rotação à planetária de entrada e a outra polia variadora movida transmitirá potência à carcaça do sistema planetário. As planetárias apresentam formato esférico para acomodar-se à parte interna do sistema e são travadas aos eixos através de chavetas. Um rolamento em cada semicilindro dá suporte aos eixos de entrada e saída. A Figura 15 representa a vista em corte do sistema planetário.

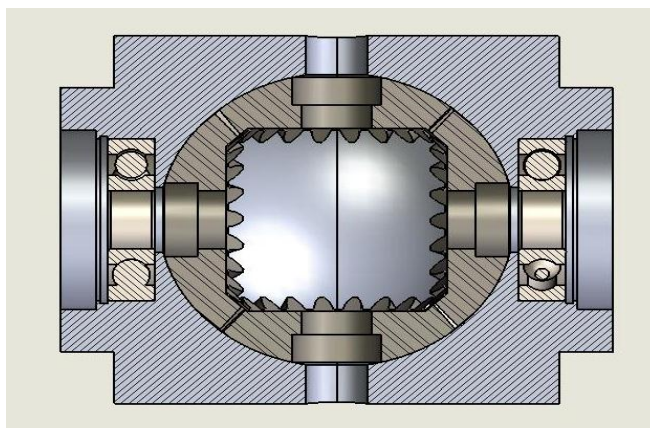


Figura 15 - Sistema planetário
Fonte: Autoria própria

4.2.4. Carcaça e Mancais

A carcaça do sistema CVT dá sustentação aos elementos da transmissão. São utilizados dois modelos de rolamentos de esferas de numeração 0440 e 17180, com diâmetros externos de 110 mm e 215 mm e diâmetros internos de 40 mm e 180 mm, apresentam espessuras de 27 mm e 18 mm, utilizados nos eixos e no sistema planetário respectivamente. Para a fixação das duas metades das carcaças são utilizados parafusos allen 8 x 30 mm. A Figura 16 representa a vista em corte da carcaça com os elementos da transmissão.

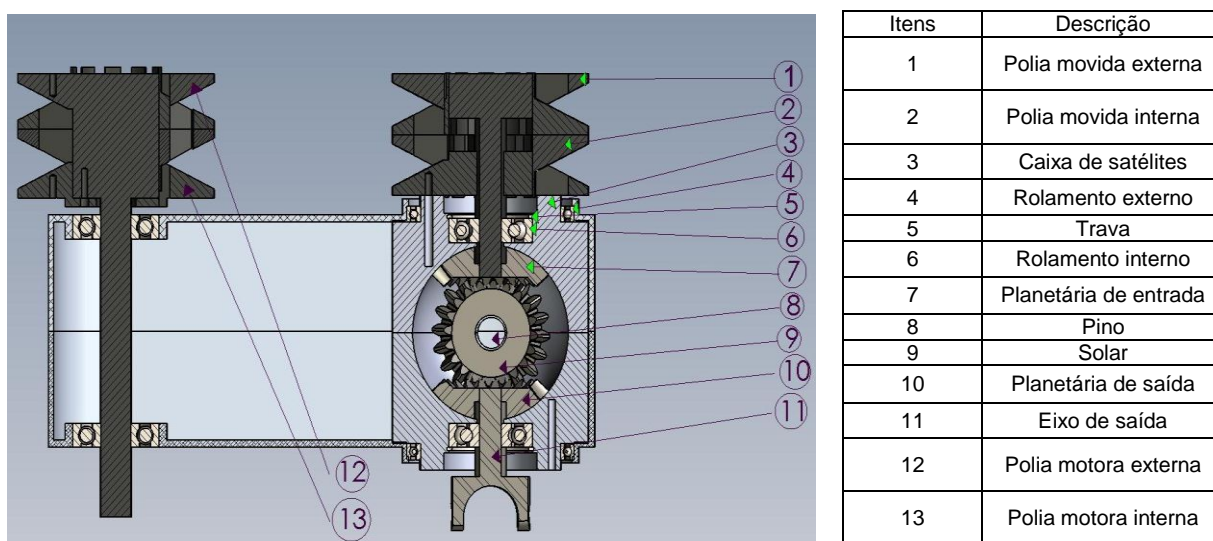


Figura 16 - Sistema de transmissão CVT
Fonte: Autoria própria

4.3. MODELAGEM EM CAD

A partir da proposta e detalhamento dos elementos da transmissão seguiu-se com a modelagem da CVT. A montagem foi realizada em etapas de sub montagem.

4.3.1. Montagem Geral da Transmissão

A Figura 17 representa a montagem geral da transmissão proposta. A primeira estrutura denominada carcaça ou chassi, item 1 da Figura 17, serve como

base para o restante da transmissão, portanto ela é a primeira peça a ser inserida para a montagem do conjunto. Após a inserção de ambas as partes da carcaça segue-se para a inserção dos rolamentos da parte movida, itens 2 e 3 da Figura 17 e da parte motora, itens 4 e 5 da Figura 17. Os rolamentos são posicionados com as seguintes relações: concêntricos em relação ao mancal da carcaça e com as faces externas da pista do rolamento e coincidentes com a face interior do mancal. Na sequência são inseridas a sub montagem das polias motoras, item 1 da Figura 18, das polias movidas, item 2 da Figura 18, do sistema planetário, item 3 da Figura 18 e do eixo de saída, item 4 da Figura 18.

A sub montagem das polias motoras é posicionada a partir de seu eixo principal, com relação de concentricidade, com os rolamentos da parte motora da transmissão. Uma relação de distância de 9.3 milímetros é aplicada entre a face posterior das polias motoras, item 6 da Figura 17 e a face do rolamento 3, item 4 da Figura 17, sendo então inserida uma restrição de translação, permitindo apenas rotação da sub montagem.

Na sequência insere-se a sub montagem do sistema planetário à montagem já realizada. Primeiramente a relação de concentricidade é aplicada entre a pista do rolamento 2, item 3 da Figura 17 e a caixa satélite do sistema planetário, item 7 da Figura 17. Posteriormente aplica-se a restrição de coincidência entre a face da pista interior do rolamento 2 e a face 1 da caixa satélite, item 8 da Figura 17.

A terceira sub montagem a ser inserida é a das polias movidas. A relação de concentricidade é aplicada entre a caixa satélite do sistema planetário, item 7 da Figura 17 e o eixo principal das polias movidas, item 9 da Figura 17. A segunda restrição se dá entre a face 1 das polias movidas, item 10 da Figura 17 e a face 2 da caixa satélite, item 11 da Figura 17 sendo a relação aplicada de coincidência entre as faces. A terceira relação é de concentricidade entre a furação das polias movidas, item 12 da Figura 17 e a furação da caixa satélite, item 13 da Figura 17. A última relação a ser aplicada às polias movidas é de bloqueio, entre a face 1 do eixo principal das polias movidas, item 14 da Figura 17 e a face interna da engrenagem de entrada do sistema planetário, item 15 da Figura 17.

Por fim insere-se o eixo de saída, item 18 da Figura 17 com relação de concentricidade com o eixo de rotação do sistema planetário e com relação de

coincidência e bloqueio entre a face do eixo de saída, item 16 da Figura 17 e a face interna da engrenagem de saída do sistema planetário, item 17 da Figura 17.

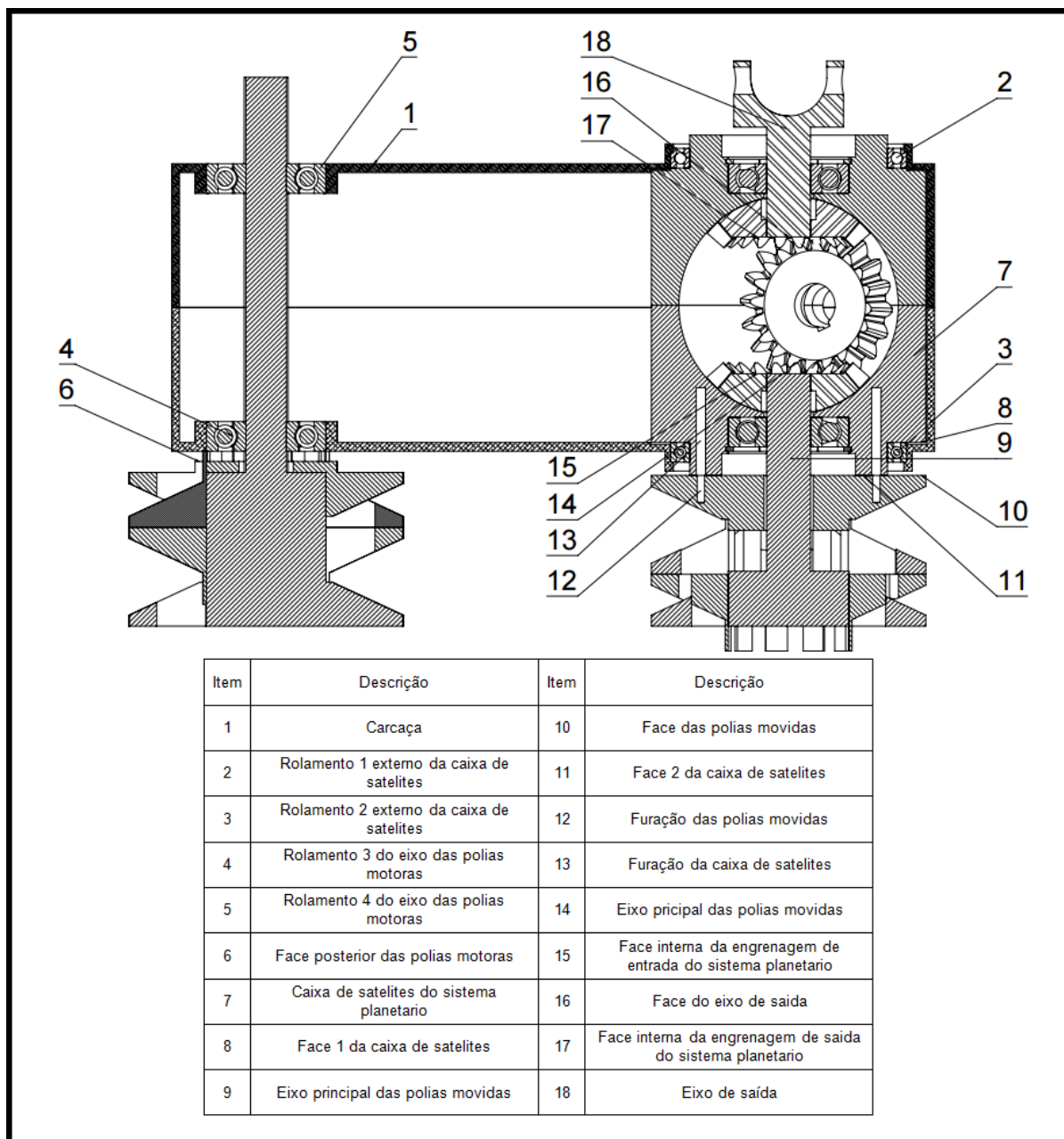


Figura 17 - Montagem geral da transmissão.
Fonte: Autoria própria

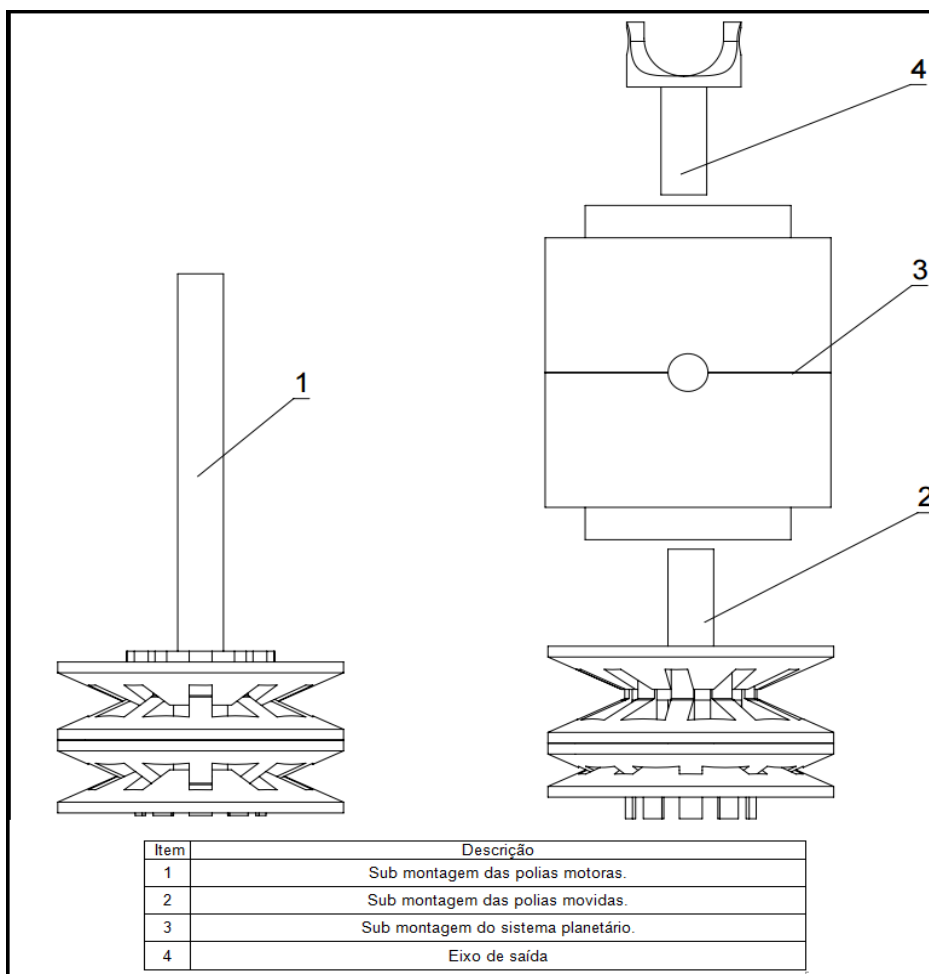


Figura 18 - Sub montagens da transmissão.
Fonte: Autoria própria

4.3.2. Sub Montagens da Transmissão

A sub montagem é uma ferramenta disponível de programa CAD em que se usa montagens menores inseridas em uma montagem principal. As sub montagens da transmissão foram divididas em 3: sub montagem das polias motoras; das polias movidas e do sistema planetário.

1) Sub montagem das polias motoras: a sub montagem das polias motoras abrangem o eixo principal, polia interna, e polia externa itens 3, 2 e 1 da Figura 19 respectivamente. Primeiramente toma-se o eixo principal como base da sub montagem, em seguida insere-se a polia interna com relação de concentricidade com o eixo principal. O segundo passo é relacionar o entalhe do eixo principal, item 4 da Figura 19 com as estrias da polia interna, item 5 da Figura 19, tomando-se uma

das faces do entalhado e uma das faces da estria e inserindo a relação de paralelismo entre elas. Essa relação é suficiente para que o eixo e a polia interna girem em conjunto.

A terceira restrição consiste em aplicar uma relação de distância máxima de 91 milímetros e mínima de 50 milímetros entre a face externa do eixo principal, item 6 da Figura 19 e a face central da polia interna, item 7 da Figura 19. O próximo passo é inserir a polia externa, através de uma relação de concentricidade entre a polia e o eixo principal. Ainda necessita a inserção de coincidência entre a face interna da polia externa, item 8 da Figura 19 e a face externa do eixo principal, item 9 da Figura 19. A última relação é a coincidência da furação da polia, item 10 da Figura 19 com a furação do eixo principal, item 11 da Figura 19. A Figura 19 representa os componentes da sub montagem das polias motoras.

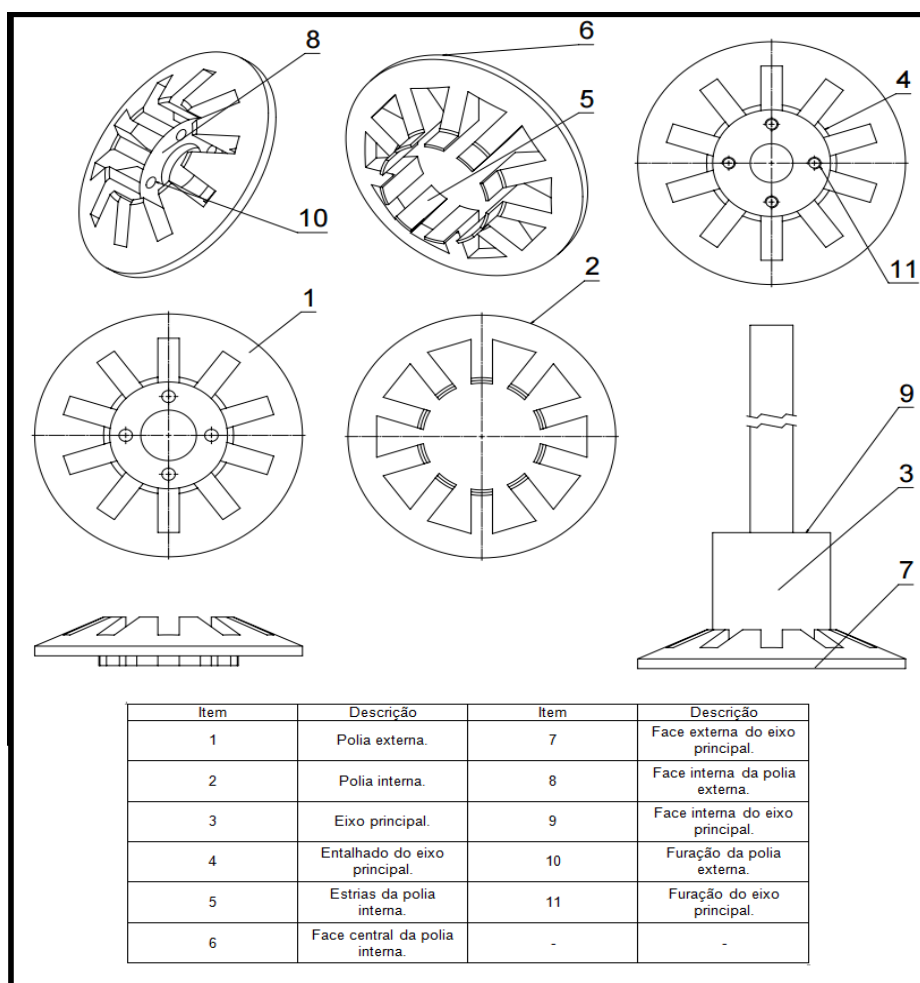


Figura 19 - Elementos da sub montagem das polias motoras.
Fonte: Autoria própria

2) Sub montagem do sistema planetário: o sistema planetário contém 11 elementos, sendo duas partes que compõe a caixa satélite, quatro engrenagens, dois rolamentos, duas travas internas e um pino central, itens 1,2,3,4 e 5 da Figura 20. Como primeira peça da montagem insere-se uma das partes da caixa de satélites, esta como referência para o conjunto, em seguida uma das engrenagens, aplicando a condição de concentricidade entre o cubo da engrenagem, item 6 da Figura 20 e o eixo de rotação da caixa satélite, item 7 da Figura 20.

A segunda relação é de concentricidade entre a face esférica da engrenagem, item 8 da Figura 20 e a parte interna da caixa satélite, item 9 da Figura 20. Insere-se as outras duas engrenagens em concentricidade com o pino central da caixa satélite, item 10 da Figura 20. Outra restrição de concentricidade é inserida entre as faces esféricas das engrenagens e a face esférica da caixa de satélites. A relação de coincidência entre a face do pino e a face da caixa satélite, itens 12 e 11 da Figura 20 deve ser aplicada.

Com a primeira parte montada, insere-se a segunda parte da caixa satélite com restrições de concentricidade com a primeira parte. Outra engrenagem deve ser inserida semelhante a primeira engrenagem, mas com seu cubo concêntrico ao eixo de rotação da segunda parte da caixa satélite e com sua face esférica concêntrica com a face esférica da caixa. Uma relação de engrenamento de 1:1 (um para um) é aplicada entre as 4 engrenagens. Finalizando a sub montagem insere-se os dois rolamentos concêntricos ao eixo de rotação das caixas satélite e com uma das faces, item 16 da Figura 20 coincidente à face de encosto do mancal da caixa, item 13 da Figura 20. Por fim as travas são inseridas concêntricas aos rolamentos e com uma das faces, item 15 da Figura 20 coincidente com a face interna do alojamento das travas, item 14 da Figura 20.

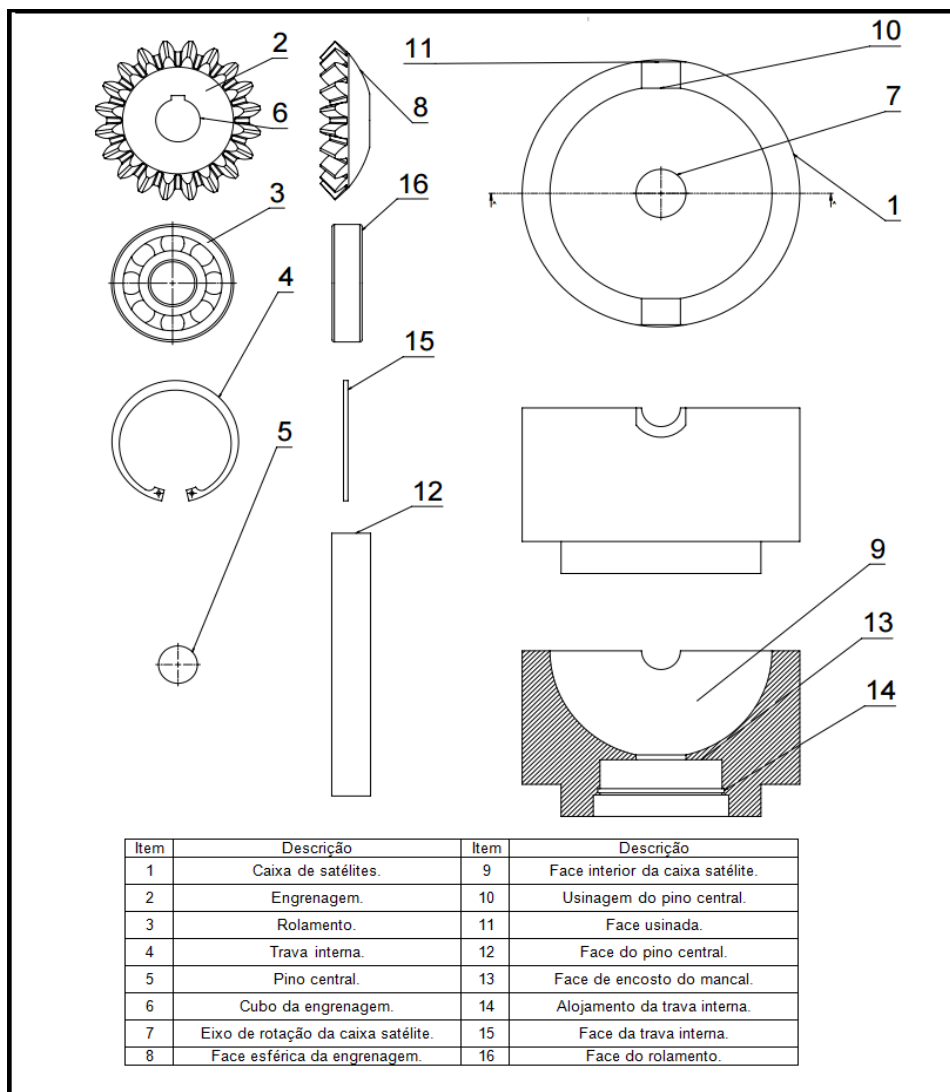


Figura 20 - Elementos da sub montagem do sistema planetário.
Fonte: Autoria própria

3) A sub montagem das polias movidas é formada por quatro peças: eixo principal, polia interna do eixo principal, polia secundaria, e polia interna secundaria, itens 1, 2, 3 e 4 da Figura 21. Para o início da montagem toma-se o eixo principal como base, inserindo a polia interna do eixo principal com relação de concentricidade com o eixo principal. Uma restrição de paralelismo entre as faces do entalhado do eixo e da estria da polia interna é aplicada para que rotacionem em conjunto, itens 5 e 6 da Figura 21. Para limitar a translação da polia interna do eixo principal é aplicada uma relação de distância máxima de 91 mm (noventa e um milímetros) e mínima de 50mm (cinquenta milímetros) entre a face externa do eixo principal e a face externa da polia interna, itens 7 e 8 da Figura 21.

Na sequência insere-se a polia interna secundária concêntrica ao eixo de rotação e com sua face interna coincidente a face externa da polia interna, itens 9 e 10 da Figura 21. A polia secundária é inserida com restrição de concentricidade com o eixo de rotação, para limitar a translação uma relação de distância de 40 mm (quarenta milímetros) é aplicada à face interna do eixo principal com a face interna da polia secundária, itens 11 e 12 da Figura 21.

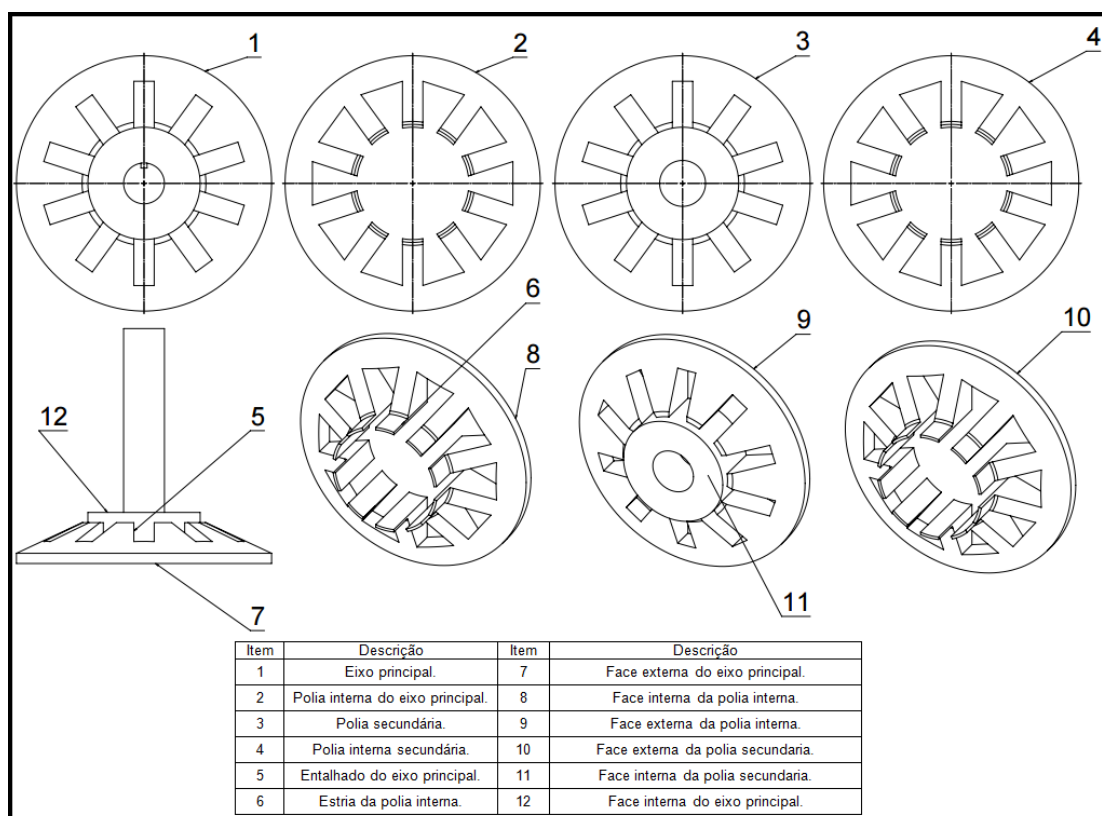


Figura 21 - Elementos da sub montagem das polias movidas.
Fonte: Autoria própria

4.4. SIMULAÇÃO

A partir do Software CAD (*Computer Aided Design*) *Solid Works*, as peças e montagem foram projetadas, realizando-se a simulação dos sistema. Tomando como base as características do motor aplicado ao Formula Baja SAE, os módulos de torque e potência aplicados às polias movidas da transmissão foram adquiridos. O material empregado nas Peças foi o Aço 1020 para o eixo de saída, Aço 4340 para o sistema planetário e ferro fundido maleável para as polias movidas e motoras. Para facilitar as soluções via modelagem computacional dividiu-se a transmissão em

4 módulos. Módulo das polias motoras, módulo das polias movidas, módulo do sistema planetário e módulo do eixo de saída. O Quadro 2 representa as propriedades dos materiais utilizados na simulação.

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico	2e+011	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.29	N/A
Módulo de cisalhamento	7.7e+010	N/m ²
Massa específica	7900	kg/m ³
Resistência de tração	420507000	N/m ²
Resistência à compressão		N/m ²
Limite de escoamento	351571000	N/m ²
Coefficiente de expansão térmica	1.5e-005	/K
Condutividade térmica	47	W/(m·K)
Calor específico	420	J/(kg·K)
Coefficiente de amortecimento do material		N/A

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico	2.05e+011	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.32	N/A
Módulo de cisalhamento	8e+010	N/m ²
Massa específica	7850	kg/m ³
Resistência de tração	1110000000	N/m ²
Resistência à compressão		N/m ²
Limite de escoamento	710000000	N/m ²
Coefficiente de expansão térmica	1.23e-005	/K
Condutividade térmica	44.5	W/(m·K)
Calor específico	475	J/(kg·K)
Coefficiente de amortecimento do material		N/A

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico	1.9e+011	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.27	N/A
Módulo de cisalhamento	8.6e+010	N/m ²
Massa específica	7300	kg/m ³
Resistência de tração	413613000	N/m ²
Resistência à compressão		N/m ²
Limite de escoamento	275742000	N/m ²
Coefficiente de expansão térmica	1.2e-005	/K
Condutividade térmica	47	W/(m·K)
Calor específico	510	J/(kg·K)
Coefficiente de amortecimento do material		N/A

Quadro 2 - Propriedades dos materiais utilizados
Fonte: banco de dados do Solidworks

4.4.1. Módulo das Polias Motoras

O módulo das polias motoras recebeu na simulação na entrada de seu eixo principal o torque máximo fornecido pelo motor de um veículo Baja SAE, sendo esse torque próximo de 18 N.m (dezoito Newton metro). Esse torque foi aplicado a face do eixo principal. Na outra extremidade do eixo principal foram aplicados recursos de fixação no raio maior da polia interna e no raio menor da polia externa deste modo gerando um torque de reação ao torque aplicado na primeira extremidade. A Figura 22 mostra a região de aplicação do torque e os recursos de fixação para a simulação do módulo das polias motoras.

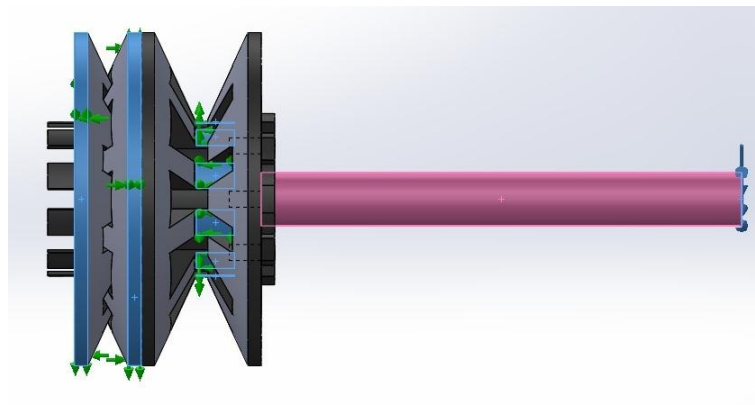


Figura 22 - Aplicação das cargas nas polias motoras.
Fonte: Autoria própria

4.4.2. Modulo das Polias Movidas

Tomando-se as posições mais extremas do curso das polias movidas aplicou-se o torque que representa a atuação do motor semelhante ao motor selecionado. O torque desenvolvido é de intensidade de 72 N.m foi aplicado na polia externa, enquanto um torque de 4.5 N.m foi aplicado na polia interna. O modo de aplicação seguiu o seguinte arranjo: Na polia externa o torque de 72 N.m foi aplicado no maior raio da polia, e na polia interna o torque de 4.5 N.m foi aplicado ao menor raio da polia. A extremidade do eixo da polia externa, bem como a lateral da polia interna, foram tomadas como fixas de modo a exercerem um torque de reação ao torque aplicado. A Figura 23 mostra o esquema de aplicação das cargas.

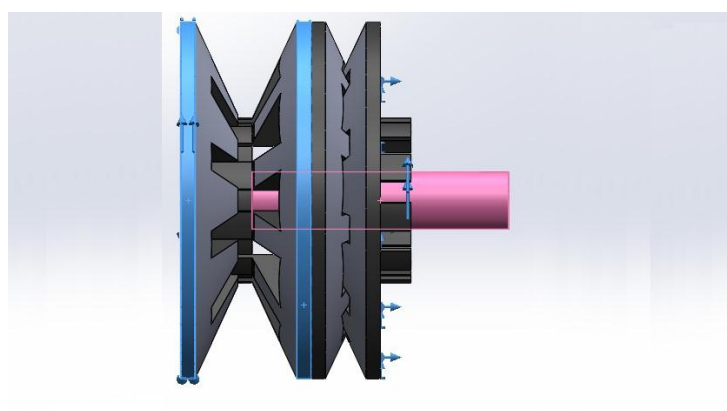


Figura 23 - Aplicação das cargas nas polias
Fonte: Autoria própria

4.4.3. Modulo do Sistema Planetário

No sistema planetário aplicou-se os mesmos módulos de torque utilizados nas polias movidas, o torque de 4,5 N.m foi transmitido à carcaça do sistema planetário, enquanto o torque de 72 N.m foi aplicado à engrenagem primária do sistema planetário. Fixou-se a engrenagem de saída e a extremidade oposta da carcaça do sistema planetário. A Figura 24 mostra o esquema de aplicação das cargas no sistema planetário.

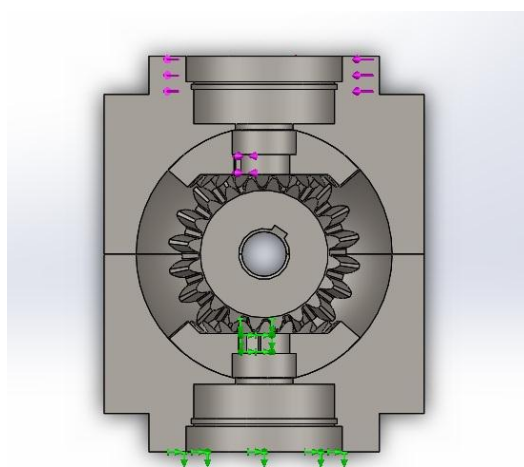


Figura 24 - Aplicação das cargas no sistema planetário
Fonte: Autoria própria

4.4.4. Modulo do Eixo de Saída

Na saída da transmissão o torque máximo é de 144 N.m sem se considerar as perdas por atrito. Para modo de simulação tomou-se esse torque desconsiderando as perdas. O modo de aplicação das cargas deu-se da seguinte forma: um torque de entrada foi aplicado na extremidade interna do eixo da cruzeta e um torque de reação criado pela fixação da extremidade oposta. A Figura 25 mostra o modelo de aplicação das cargas.

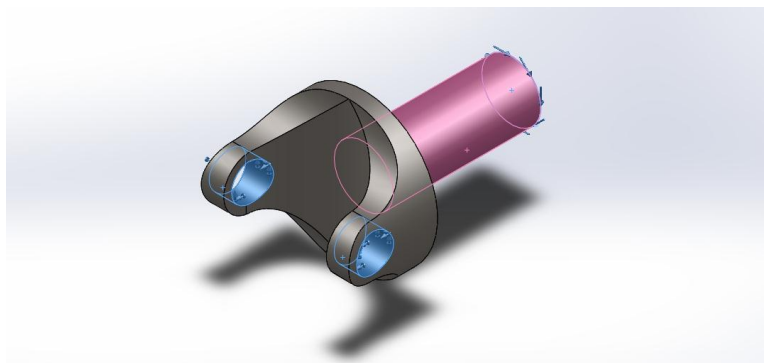


Figura 25 - Aplicação das cargas na cruzeta
Fonte: Autoria própria

4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os quatro módulos simulados geraram três modelos de resultados: Tensão, Deformação e Deslocamento. O Quadro 3 mostra os resultados para os quatro módulos simulados.

Módulo	Tensão Máxima	Deformação Máxima	Deslocamento Máximo	Limite de escoamento
Polias motoras	24.500.000 N/m ²	0.00001	0.0037 mm	270.000.000 N/m ²
Polias movidas	26.000.000 N/m ²	0.000093	0,18 mm	270.000.000 N/m ²
Sistema planetário	2.000.000 N/m ²	0.000007	0,0002 mm	700.000.000 N/m ²
Eixo de saída	13.000.000 N/m ²	0.000052	0.0095 mm	350.000.000 N/m ²

Quadro 3 - Resultados da simulação
Fonte: Autoria própria

Para o modulo das polias motoras observamos que a tensão máxima chegou a 24,5MPa. Esta tensão foi empregada ao longo do eixo principal, desde a face de aplicação do torque de entrada até o local onde posicionam-se as polias. Esse valor de tensão é cerca de dez vezes menor que o limite de escoamento do material utilizado, neste caso, o ferro fundido maleável. Nas outras seções do eixo principal e nas outras partes da sub montagem a tensão atingiu menores intensidades. A Figura 26 mostra as tensões no módulo das polias motoras.

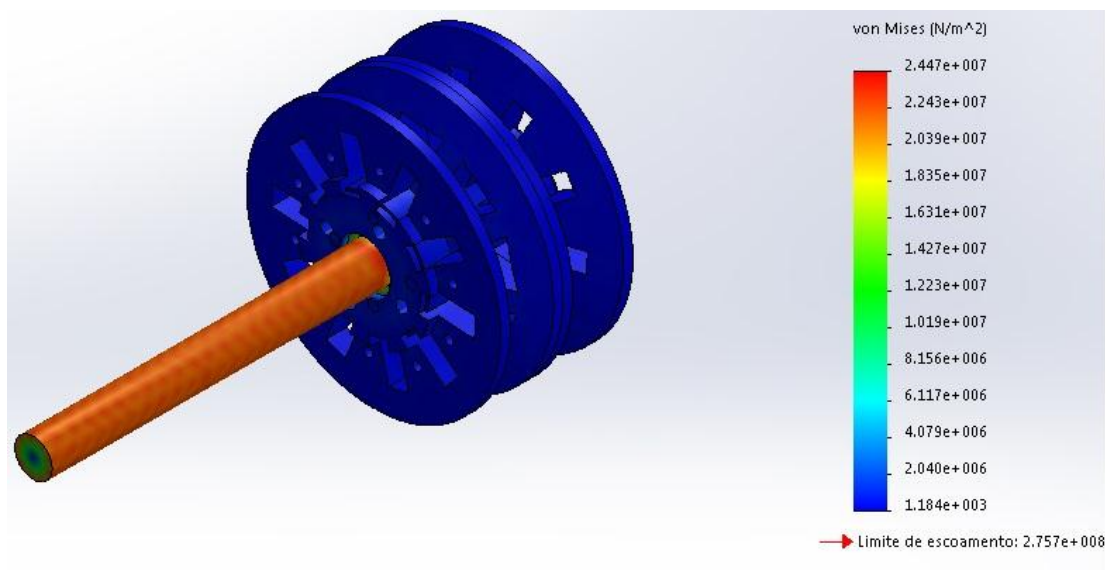


Figura 26 - Tensões na sub montagem das polias motoras
Fonte: Autoria própria

No módulo das polias movidas a tensão máxima atingida durante a simulação foi de 26MPa e foi aplicada a seção de menor área do eixo das polias movidas. O valor de tensão máxima encontrado é também próximo de dez vezes menor que o limite de escoamento do material empregado à sub montagem das polias movidas. Semelhante ao modulo das polias Motoras as tensões aplicadas às polias e demais localidade atingiram valores menores. A Figura 27 mostra as tensões ao longo das polias movidas.

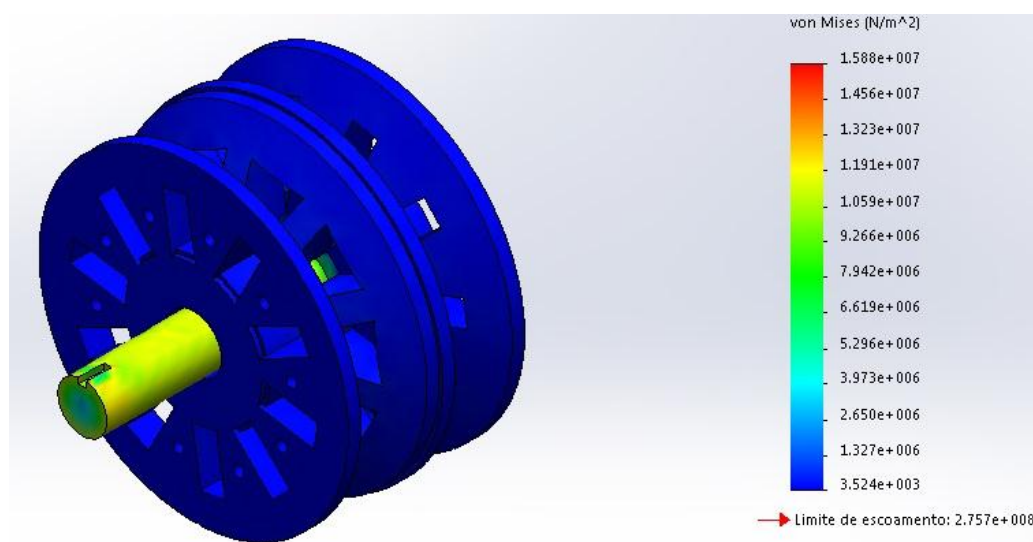


Figura 27 - Tensões na sub montagem das polias movidas
Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados do modulo do sistema planetário percebeu-se que a tensão máxima recebida é de 2MPa, sendo esse valor trezentos e cinquenta vezes menor que a tensão de escoamento do material (Aço 4340). A região de aplicação da tensão máxima foi o cubo da engrenagem de entrada do sistema planetário. A Figura 28 mostra as tensões no sistema planetário.

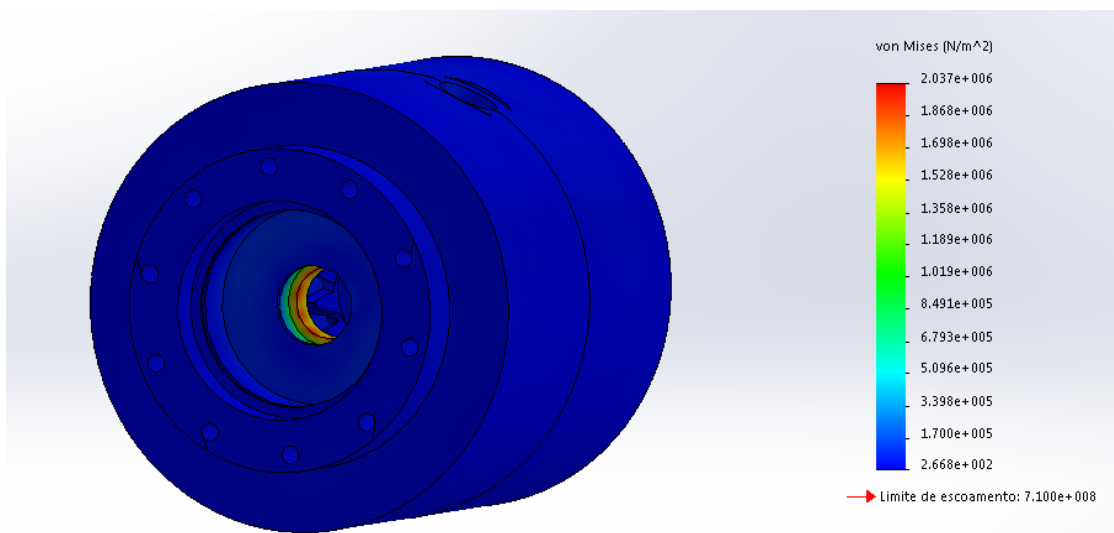


Figura 28 - Tensões na sub montagem do sistema planetário
Fonte: Autoria própria

No eixo de saída a tensão máxima empregada chegou a 13MPa, sendo aplicada a seção de menor área transversal do eixo. Esse valor de tensão é cerca de 27 vezes menor que o limite de escoamento do material utilizado (Aço 1020). A figura 29 mostra as tensões no eixo de saída.

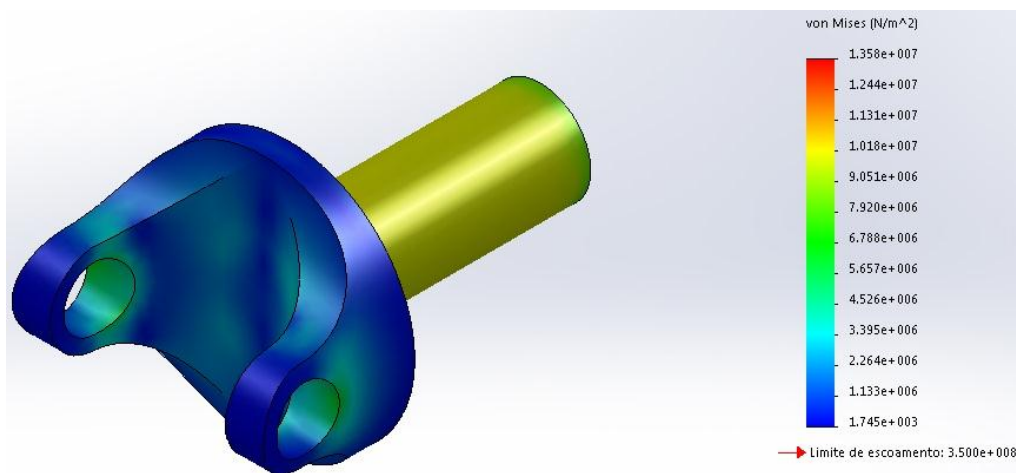


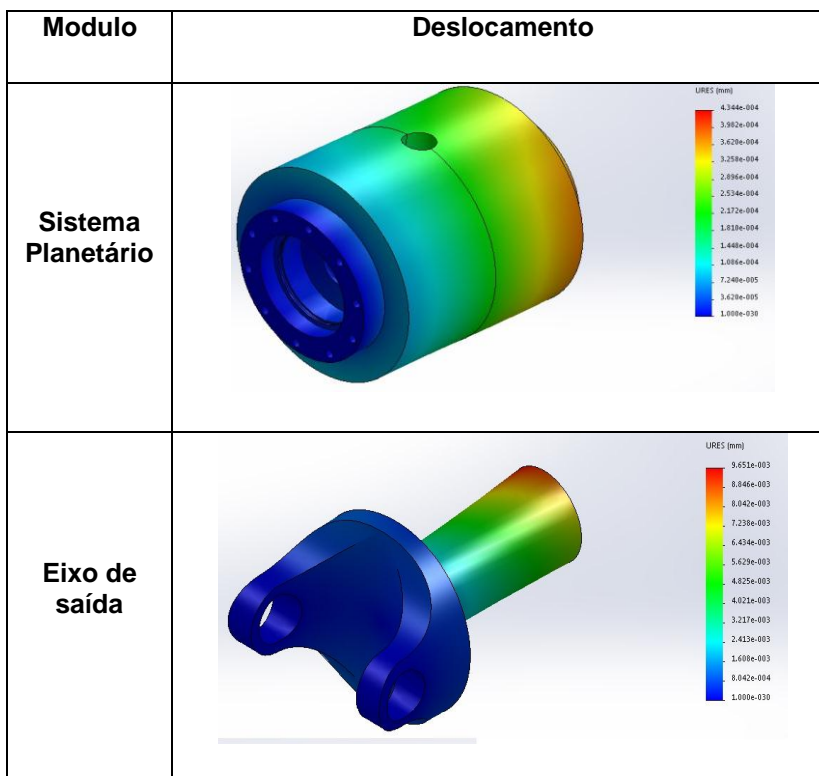
Figura 29 - Tensões no eixo de saída
Fonte: Autoria própria

Observando os resultados obtidos nas simulações dos módulos da transmissão, constatou-se que em nenhum momento os esforços aplicados superaram o limite de escoamento dos materiais empregados, portanto a transmissão suportaria o Torque aplicado por um motor de características iguais a de um motor do Baja SAE. Além disso se considerar que a tensão máxima observada foi dez vezes menor que a tensão de escoamento do material, podemos dizer que um coeficiente de segurança de dez foi encontrado, podendo assim ser empregados esforços ainda maiores que os previstos para a simulação.

A simulação gerou resultados de deformação percentual que leva em conta a posição inicial e a posição após a deformação sendo portanto uma grandeza relativa. Os valores de deformação obtidos foram extremamente pequenos pois as tensões aplicadas foram baixas em relação às tensões de escoamento dos materiais empregados.

O Quadro 4 mostra os resultados de deslocamento gerados pela simulação nos quatro módulos.

Modulo	Deslocamento
Polias Motoras	
Polias Movidas	



Quadro 4 - Resultados de deslocamento da simulação
Fonte: Autoria Própria

Analisando a tabela 3 no modulo das polias motoras vemos que o maior deslocamento está na região de maior raio das polias. O deslocamento máximo chega a 0.0037 mm nesta região.

No modulo das polias movidas encontramos valores de deslocamento que chegam a 0,18 mm também na região de maior raio da polia. A polia interna do modulo das polias movidas sofre menor deslocamento pois na montagem é acoplada ao sistema planetário o que aumenta a rigidez da peça.

O deslocamento máximo no sistema planetário é de 0,0002 mm, esse deslocamento é empregado na face de acoplamento do sistema planetário com a polia interna da sub montagem das polias movidas.

No eixo de saída observamos um deslocamento de 0,0095 mm atuante na face de entrada do torque no eixo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando os resultados da simulação pode-se concluir que a transmissão poderia ser aplicada em um veículo Baja SAE com um coeficiente de segurança mínimo de dez vezes. Esse coeficiente leva em consideração que a tensão mais próxima do limite de escoamento do material foi aplicada ao modulo das polias movidas e teve intensidade 10 vezes menor que o limite de escoamento.

O desenvolvimento da transmissão foi além de suportar as cargas aplicadas, ele levou em conta a simplicidade das peças e de sua fabricação. A reversibilidade do sistema mostrou ser também uma grande vantagem deste arranjo, podendo a transmissão ser empregada em outras maquinas sendo redimensionada para os esforços empregados.

O Benchmarkig aplicado aproveitou as melhores características dos modelos de transmissão CVT atuais, porem para se chegar a valores de eficiência estudos mais aprofundados poderiam ser feitos, utilizando computadores e *softwares* potentes na área de simulação ou ainda um protótipo poderia ser feito para realização de testes e levantar as características da transmissão.

REFERÊNCIAS

AKEHURST, S.; BRACE, C.J.; VAUGNAN N.D.; MILNER, P.J. Performance investigations of a novel Rolling Traction CVT, SAE technical paper 2001-01-0874, SAE World Congress, Detroit, Março de 2001.

ALBUQUERQUE, A. A. Caracterização da resposta dinâmica de uma CVT por polias expansivas, Dissertação de Mestrado, Faculdade de engenharia Mecânica, Unicamp. Campinas-SP, 2003.

BOSCH,R,G. Bosch Automotive Handbook, 6a ed, Alemanha, 2001.

CASEIH. Case IH Expands CVT Offering Into Maxxum 110-130 Models, Technical Article, 2014. Disponível em: < https://www.caseih.com/northamerica/en-us/News/Pages/2013-8-27-case_ih_expands_cvt_offering_maxxum_models.aspx>. Acesso em 10 de Junho de 2015.

CASTELETTI, L. F. Mancais, Rolamentos, Elementos de transmissão, Lubrificação e Alinhamento de Máquinas, Apostila de Elementos de Transmissão, 2012. Disponível em: < <http://www.casteletti.com/wp-content/uploads/2012/11/MANCAISROLAMENTOS-ELEMNTOS-DETRANSMISS%C3%83O.pdf>>. Acesso em 20 de Maio de 2015.

COLLINS, J. A. Projeto Mecânico de Elemento de Máquinas: uma perspectiva de prevenção de falha, LTC, Rio de Janeiro, 2006.

CRETU, O.S.; GLOVNEA, R.P. Constant power continuously variable transmission (CP-CVT): Operating principle and analysis. Journal of Mechanical Design, Vol. 127, 1, 114-119, ASME Transaction, 2005.

CVT - Continuously Variable Transmission. Disponível em: < <http://cars.about.com/od/thingsyouneedtoknow/a/CVT.htm>>. Acesso em 11 de março de 2015.

CVT de Polias Expansivas. Disponível em: . Acesso em 12 de maio de 2015.

DIAS, J. Curso de especialização em Engenharia Automotiva, Departamento de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

Gears: An Historical Note. Disponível em: <http://www.efunda.com/designstandards/gears/gears_history.cfm>. Acesso em 11 de março de 2014.

GOTT, P. G. Changing Gears: The development of the automotive transmission, Society of Automotive Engineers, USA, 1991.

HAMEER, S. A Comparative Study and Application of Continuously Variable Transmission to a Single Main Rotor Heavy Lift Helicopter, Tese (Doutorado em Engenharia Aeroespacial), Georgia Institute of Technology, USA, 2009.

HOWSTUFFWORKS. How CVTs works, technical article, 2005. Disponível em: <<http://auto.howstuffworks.com/cvt2.htm>>. Acesso em 17 de Abril de 2015.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. Fundamentals of Machine Component Design, 5 a ed, John Wiley and Sons, Inc, 2011.

LUK. CVT development at LuK, Technical Article, 2009. Disponível em: . Acesso em 08 de Abril de 2015.

MADMIL. A Polia, Artigo Técnico, 2015. Disponível em: <<http://www.mademil.com.br/empresa/a-polia>>. Acesso em 29 de Maio de 2015.

NISSAN. Extroid CVT, Technical Note, 1999. Disponível em: <http://www.nissan-global.com/PDF/tcvt_e.pdf>. Acesso em 19 de Março de 2015.

NORTON, L. R. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. Trad. de João Batista de Aguiar et al. 2ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2004.

Polia de face plana com abaulamento. Disponível em: <http://www.geocities.ws/rd_recife/polia_plana.html>. Acesso em 29 de Maio de 2015.

Polias de face cilíndrica. Disponível em: <<http://conklinmanufacturing.com>>. Acesso em 29 de Maio de 2015.

SAE. Toyota engineers put a shine into the 2014 Corolla, Technical Article, 2014. Disponível em: <<http://articles.sae.org/12444/>>. Acesso em 05 de Junho de 2015.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. Projeto de Engenharia Mecânica, 7a ed., Bookman, Brasil, 2004.