

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Cleberson Vitor dos Santos

**FABRICAÇÃO DE UM MINIRREDUTOR MODELO CICLOIDAL UTILIZANDO
IMPRESSÃO 3D**

Betim

2020

CLEBERSON VITOR DOS SANTOS

**FABRICAÇÃO DE UM MINIRREDUTOR MODELO CICLOIDAL UTILIZANDO
IMPRESSÃO 3D**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Betim para obtenção do grau de bacharel em Engenharia mecânica.

Orientador: Pedro Colen Neto

Betim

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

S237f Santos, Cleberson Vitor dos
Fabricação de um minirredutor modelo cicloidal utilizando
impressão 3d / Cleberson Vitor dos Santos. – 2021.
54 f.: il.
Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia
Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais Câmpus Betim, 2021.

Orientação: Prof. Pedro Colen Neto.
1. Minirredutor. 2. Redutor cicloidal. I. Santos, Cleberson
Vitor dos. II. Instituto Federal de Minas Gerais, Câmpus
Betim, Bacharelado em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU 621.38

Elaborada pelo Bibliotecário Samuel Gonçalves Proença CRB-6/3265

Cleberson Vitor dos Santos

**FABRICAÇÃO DE UM MINIRREDUTOR MODELO CICLOIDAL UTILIZANDO
IMPRESSÃO 3D**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica do Instituto
Federal de Minas Gerais - *Campus* Betim para
obtenção do grau de bacharel em Engenharia
mecânica.

Aprovado em: 23 / 02 / 2021 pela banca examinadora:



Prof. Me. Pedro Colen Neto – IFMG (Orientador)



Prof. Dr. André Fonseca Félix – IFMG



Prof. Me. Evanilton José Alves Barbosa – IFMG

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus amados pais, Sebastião Vitor dos Santos, e Maria José Augusta dos Santos e também a minha Esposa e filho, Shirley Sandrer e Victor Hugo, todos incentivadores, confiantes no sucesso dessa empreitada, fonte constante de apoio, amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir está superando mais essa empreitada, por ter me concedido força e saúde para transpor todos os obstáculos dessa caminhada.

Aos meus pais, Sebastião Vitor e Maria José, que desde sempre acreditaram em minha formação e dedicaram muito esforço para contribuir com minha caminhada até aqui e que durante toda minha vida incentivaram e acreditaram em min.

Aos amigos e colegas que durante a graduação foram colaboradores do meu sucesso e fizeram com que as dores da caminhada fossem de alguma forma abrandadas e em especial ao amigo Cleiton Alves do curso de Engenharia de Controle e Automação que foi quem desencadeou o meu interesse pelo projeto.

Agradeço em especial a dois amigos de trabalho, Marcio José e Marcela Ferreira, que de forma persistente me convenceram a voltar a estudar mesmo depois de 20 anos da última formação e formam sempre grandes incentivadores.

A empresa Ypy-Eng, que sempre contribuiu prontamente e intensivamente com minhas necessidades e solicitações e soube valorizar a todo esse processo.

Ao IFMG-Betim, e a todos os meus professores que usaram de sua vocação e dedicação a transferir a todos os alunos o conhecimento, de forma profissional e respeitosa.

Agradeço ao meu orientador Pedro Colen, que desde o primeiro momento se colocou à disposição e abraçou o projeto, me instruindo com paciência apontando o caminho correto e seguro, sempre com sabedoria e dedicação.

Por fim, agradeço e peço que Deus abençoe a cada um que de forma direta ou indireta tenha contribuído com o meu processo de formação.

RESUMO

Atualmente existe uma crescente demanda por automatização dos produtos e, pensando em aproveitar o potencial da tecnologia de impressão 3D hoje disponíveis e de fácil acesso, particularmente no meio acadêmico, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo de minirredutor do tipo cicloidal de duplo estágio. O trabalho traz uma metodologia para produção do minirredutor modelo cicloidal de duplo estágio com duas configurações no conjunto de engrenagens. O acionamento dos minirredutores é realizado por um motor de corrente contínua de alta rotação. O minirredutor após testes preliminares, foi acoplado a um mecanismo de acionamento de uma cortina persiana do tipo Rolô *Blackout*. Foram desenvolvidos os cálculos e demais dados para fabricação e posteriores testes do minirredutor. Dentre esses uma metodologia do perfil das engrenagens cicloidais de modo parametrizado, modelagem 3D do projeto, especificação técnica e lista de material completa com custo médio de aquisição dos componentes, parâmetros básicos para impressão na técnica FDM, e foram executados os testes, gerando relatórios com os valores de rotação e torque no eixo de saída.

Palavras-chave: minirredutor, parametrização engrenagem cicloidal, redutor cicloidal, fabricação de minirredutor.

ABSTRACT

There is a growing demand for automation of products, and, thinking of taking advantage of the potential of 3D printing technology available today and easily accessible, particularly in academic studies. The present work proposes the development of a model of double-cycloidal stage type mini-reducer. This work brings a methodology for the production of the double-stage cycloidal model mini-reducer with two configurations in the gear set. The activation of the mini-reducers is carried out by a high speed DC motor. After preliminary tests, the mini reducer was coupled to a roller blackout curtain actuation mechanism. Calculations and other data for the manufacture and subsequent tests of the mini reducer were developed. Among these, a methodology of the profile of cycloidal gears in a parameterized way, 3D modeling of the project, technical specification and complete material list with average cost of acquisition of the components, basic parameters for printing in the FDM technique, and the tests were performed, generating reports with the speed and torque values on the output shaft.

Keywords: mini-reducer, cycloidal gear parameterization, cycloidal reducer, manufacture of mini-reducer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Elementos do redutor planetário	14
Figura 2– Visão interna do redutor planetário múltiplo estágio	15
Figura 3– Partes que compõem o redutor Harmônico	16
Figura 4– Posições de montagem o Redutor Harmônico	17
Figura 5– Exemplo cálculo da transmissão redutor cicloidal.....	19
Figura 6 - Movimento provocado pela força radial externa redutor cicloidal.....	20
Figura 7– Movimento planetário do redutor cicloidal.....	20
Figura 8– Movimento angular e excêntrico.....	21
Figura 9- Modelo Esquemático Tecnologia FDM.....	23
Figura 10– Software Simplify3D	23
Figura 11- Esquema base para projeto do redutor cicloidal.....	26
Figura 12 – Relação de transmissão do minirredutor cicloidal	29
Figura 13- Identificação das variáveis do engrenamento cicloidal.	30
Figura 14- Traçado das linhas de base do disco cicloidal	31
Figura 15- Traçado do cicloide contraído e geração do disco cicloidal contraído	31
Figura 16 – Identificação dos raios e ângulos para parametrização	32
Figura 17- disposição dos discos cicloidais.....	35
Figura 18- Perspectiva do projeto do minirredutor cicloidal.....	36
Figura 19- Vista explodida do minirredutor cicloidal 120:1 – modelo-01	37
Figura 20- Vista explodida do minirredutor cicloidal 120:1 – modelo-02.....	37
Figura 21-Configurações de impressão – 1	38
Figura 22-configurações de impressão-2.....	39
Figura 23- Carcaça completa e componentes do conjunto de engrenagens – modelo-01	40
Figura 24- Carcaça, conjunto de engrenagens, e disco de saída – modelo-01	40
Figura 25- Carcaça completa e componentes do conjunto de engrenagens – modelo-02.....	41
Figura 26- Carcaça, conjunto de engrenagens, e disco de saída – modelo-02	41
Figura 27- Minirredutor cicloidal completo	42
Figura 29-sistema de medição da rotação.....	44
Figura 29-teste de torque	46
Figura 30-conjunto completo de acionamento da cortina	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Planilha de cálculos para parametrização.....	34
Tabela 2- Custo médio dos materiais do minirredutor cicloidal	43
Tabela 3- rotação no eixo de saída	44
Tabela 4-verificação do torque mínimo e máximo.....	45
Tabela 5- rotação de funcionamento modelo-2 -120:1.....	47
Tabela 6- rotação de funcionamento do modelo 2 -150:1	48

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1.	Sistemas de transmissão (redutores).....	13
1.1.1.	Redutor Planetário	14
1.1.2.	Redutor Harmônico	16
1.1.3.	Redutor cicloidal.....	18
1.2.	Impressão FDM (<i>Fused Deposition Modeling</i>).....	22
1.2.1.	O software de fatiamento.....	23
2.	Justificativa	24
3.	PROPOSTA E Objetivo	24
4.	Materiais e métodos.....	25
4.1.	Softwares:	25
4.2.	Equipamentos:	25
4.3.	Materiais:	25
4.4.	Método:.....	26
4.4.1.	Cálculos básicos para confirmação do dimensionamento do redutor.....	28
4.4.2.	Procedimento de parametrização da engrenagem cicloidal.....	30
4.4.3.	Processando dados iniciais em uma planilha do Excel:.....	33
4.4.4.	Modelagem do miniredutor cicloidal	35
4.4.5.	Parâmetros básicos para impressão;	38
4.4.6.	Preparação das peças impressas e montagem do conjunto.....	39
5.	custo de fabricação	42
6.	resultados dos Testes e discursões	43
6.1.	Medição da velocidade angular no eixo de saída [RPM]	44
6.2.	Medição do torque no eixo de saída	45
6.3.	Teste prático funcional e medição da rotação.....	46
7.	conclusões e sugestões.....	48

7.1. Conclusões.....	48
7.2. Sugestões para trabalhos futuros	49
8. Bibliografia:.....	50
9. Anexo-01	53
10. Anexo-02	54

1. INTRODUÇÃO

Desde a invenção do redutor modelo cicloidal por Lorenz K. Braren^[01] em 1929 e o aprofundamento da pesquisa de Blanche e Yang^[02], que descreve a geometria do disco cicloidal, e realiza um estudo analítico de tolerâncias para a fabricação, houve inúmeros avanços e propostas de otimização do mecanismo ^[03] como um projeto compacto em dois estágios, onde o número de peças é reduzido.

Nos dias atuais estamos vivenciando transformações radicais nos meios de produção, na área da educação, social, econômica, cultural e ambiental, sobretudo uma área em específico que é a prototipagem vem se destacando de maneira expressiva principalmente pelo advento e popularização da impressão 3D, onde a tecnologia que mais está difundida no mercado atualmente é a FDM (*Fused Deposition Modeling*).

Pensando em aproveitar o potencial da tecnologia de impressão 3D hoje disponíveis e de fácil acesso principalmente no meio acadêmico e a crescente demanda por automatização dos produtos o presente trabalho propõe o desenvolvimento, fabricação e teste de um modelo de minirredutor do tipo cicloidal de duplo estágio baseado na proposta publicada *no Journal of Mechanical Design-ASME* ^[03], de um redutor que possui um disco cicloide para cada estágio, ou seja, dois discos cicloides no total, o que significa que é bastante compacto, e fazendo algumas adaptações de projeto para torna-lo mais fácil de ser produzido, desta forma o presente trabalho busca responder a seguinte questão: como fabricar um minirredutor cicloidal de duplo estágio utilizando impressão 3D (FDM) e materiais de fácil aquisição?

A grande demanda por automatizar elementos de máquinas faz com que a área da mecânica esteja em perpetua adaptação e promovendo melhorias nos equipamentos, máquinas, produtos e serviços.

Na dissertação que descreve sobre soluções *Anti-Backlash* ^[04], o autor reforça que os redutores tradicionais modelo cicloidal são amplamente utilizados na área da robótica mais precisamente em juntas rotativas por terem folgas muito pequenas e alta capacidade de redução, porém possuem um elevado custo de aquisição.

Sendo assim o minirredutor proposto neste trabalho deve atender a uma grande demanda na área de automação de sistemas menores com menor exigência e assim contribuir para a criação de novos produtos ou melhoria de outros. O projetista terá em mãos uma ferramenta adicional para auxiliar na definição dos parâmetros e fabricação do protótipo de modo exclusivo, sob demanda, flexibilizando ainda mais o desenvolvimento de produtos.

Neste trabalho desenvolveu-se um padrão para fabricação de minirredutor do tipo cicloidal que poderá facilmente ser acoplado a um motor de corrente contínua ou até mesmo a um motor de passo e esses serem usados para acionamento e controle de pequenos movimentos como acionamento de cortinas, abertura e fechamento de armários ou qualquer outro tipo de acionamento característico.

Uma motivação para o desenvolvimento do trabalho foi a necessidade apresentada por um aluno do curso de Engenharia de Controle e Automação do IFMG – Betim em automatizar uma cortina tipo persiana rolo *blackout* com baixo custo de produção, após ter sido feito o cálculo do torque mínimo necessário e a velocidade média para o acionamento foi realizada uma busca no mercado por um motorredutor ou um motor de passo com as especificações mínimas, porém, os modelos ofertados ou estavam sobre ou sub dimensionados e os modelos que atendiam o projeto estavam fora do custo previsto para a viabilidade do projeto sem mencionar a questão da forma e dimensões dos modelos e as adaptações necessárias.

1.1.Sistemas de transmissão (redutores)

Redutores de velocidade são equipamentos destinados a elevar o torque de um determinado acionamento e por consequência diminuir a rotação do eixo de saída com a menor perda de potência possível ^[05], isso sem a necessidade de recorrer a configurações de redução de velocidade que usariam engrenagens ou polias com uma enorme diferença de diâmetros.

São diversos os tipos de redutores de velocidade nas indústrias. Cada tipo tem suas próprias características com vantagens e desvantagens.

Caixa de engrenagens de dente reto, de engrenagens helicoidal, sem-fim coroa e similares são amplamente utilizados na indústria, são basicamente construídos de forma similar com engrenagens de dentes retos, helicoidais e cônicos, com os eixos dispostos em paralelo, cruzados ou de forma coaxial; existem modelos desses mesmos redutores em escala reduzida (minirredutores) e apresentam as mesmas características, porém, não são usuais no campo da robótica, onde a escolha fica dentre os redutores do tipo Planetário, Harmônico e Cicloidal^[06], relativo a esses três últimos são apresentadas suas características básicas e comparações, mostrando o porquê do modelo cicloidal ser o escolhido para o experimento.

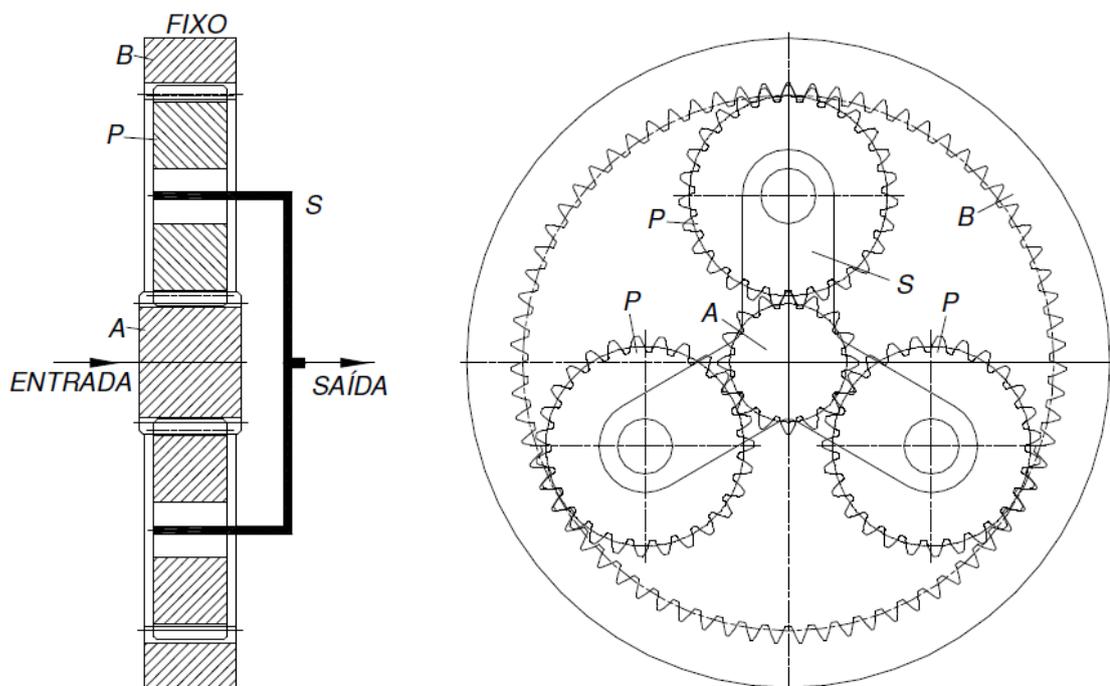
1.1.1. Redutor Planetário

Redutores planetários ^[07] constituem-se geralmente de quatro elementos principais conforme ilustrado na figura 1: Um eixo pinhão solar (A), uma engrenagem interna (B), um suporte planetário (S) e três engrenagens planetárias (P).

As engrenagens planetárias são engrenadas com eixo pinhão solar e possuem um movimento giratório transmitido ao suporte planetário que é apoiado por mancais.

A figura 1 mostra o esquema de um conjunto planetário dos mais simplificados e usados na indústria em geral, onde pode alcançar uma redução de até $i = 13$.

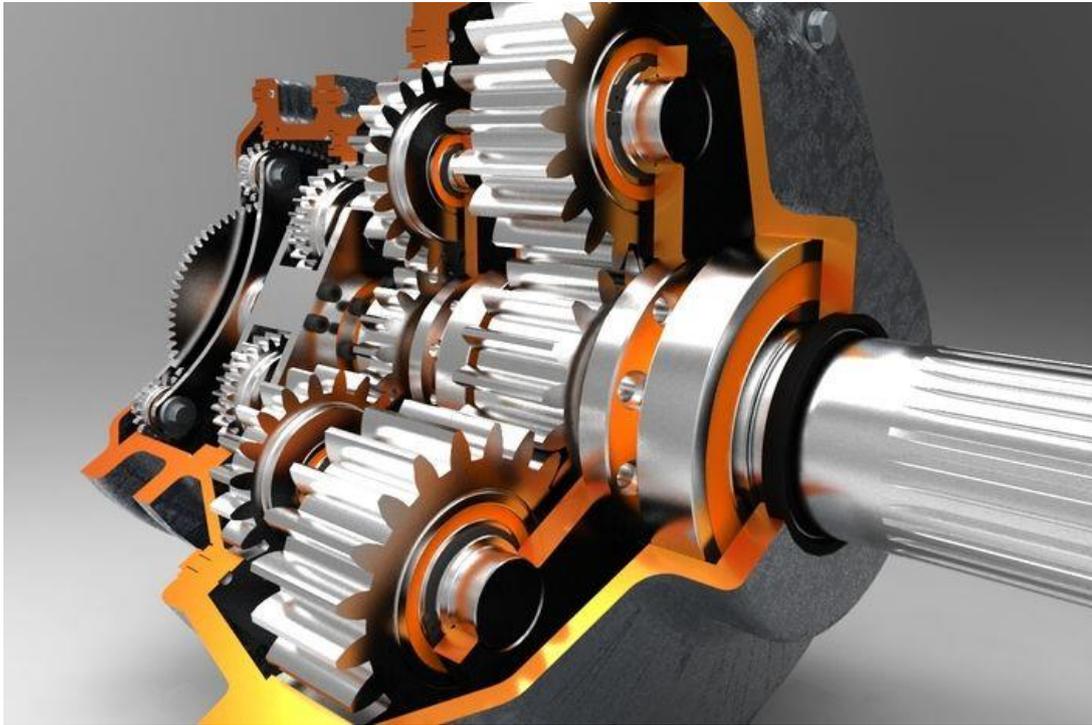
Figura 1– Elementos do redutor planetário



Fonte: catálogo redutores planetários ^[07].

O acionamento é feito através do eixo pinhão solar e a transmissão do torque através do suporte planetário. A engrenagem interna é fixa com a carcaça do redutor e serve de apoio do momento de torção. O torque de entrada proveniente do eixo pinhão solar será repartido sobre três pontos de engrenamento correspondente ao número de engrenagens planetárias e flui para o suporte planetário já como torque de saída, uma visão geral é ilustrada na figura 2.

Figura 2– Visão interna do redutor planetário múltiplo estágio



Fonte: Pinterest [22].

A relação de transmissão é calcula da seguinte forma:

$$i = Z_b / Z_a + 1 \quad (1)$$

Onde;

Z_b = número de dentes da engrenagem interna.

Z_a = número de dentes do eixo pinhão solar.

Suas principais vantagens são: taxa de redução de até $i=13$ por estágio, tamanho reduzido e um custo menor se comparado a um redutor de eixos paralelos.

Algumas características influenciaram diretamente em não optar pela fabricação deste modelo são elas: de toda forma seriam necessários dois estágios para atender a taxa de redução pretendida, ter muitas peças moveis para serem impressas, as engrenagens são de dentes helicoidais e a precisão na impressão 3D é mais difícil de se controlar, e o acumulo de variações dimensionais das muitas peças envolvidas poderia trazer um problema nos ajustes finais para funcionamento e tempo de produção.

1.1.2. Redutor Harmônico

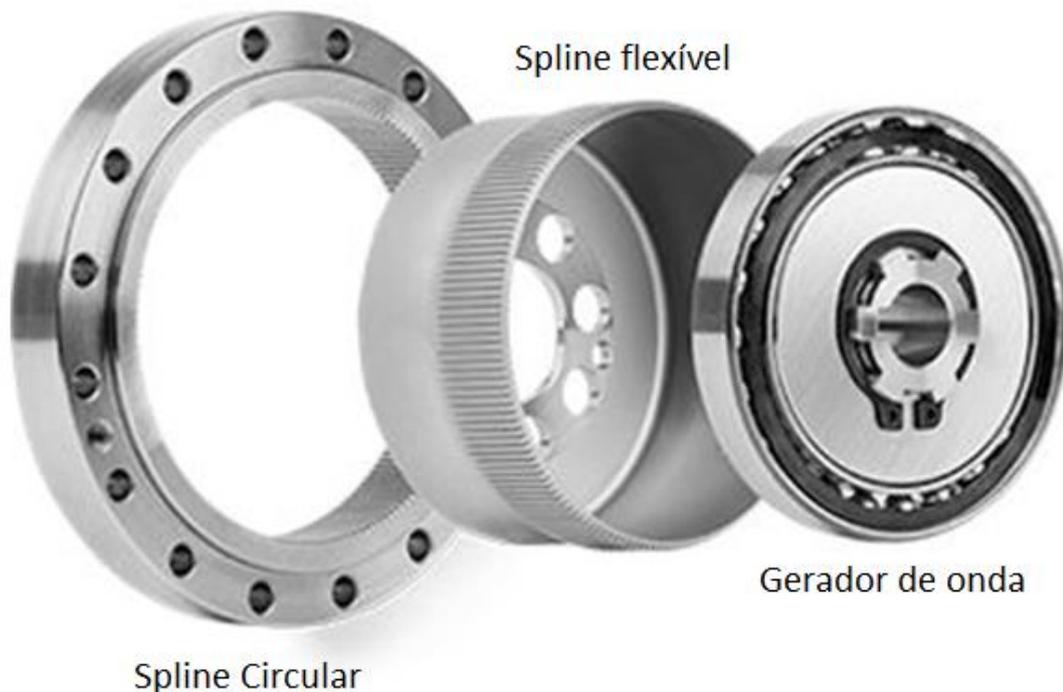
Consistindo em apenas três componentes individuais, eles são muito leves e compactos. São os redutores mais compactos que existem tanto em termos de volume, como em termos de peso e inércia ^[06]. Uma de suas limitações é a rotação do eixo de entrada que normalmente tem o limite máximo é de cerca de 6000 rpm ^[04].

Partes principais ^[06] – conforme ilustrado na figura 3:

- Gerador de onda: came na forma elíptica;
- “Spline” flexível: engrenagem “fina” com dentes externos montada sobre o gerador de onda (aço mola);
- “Spline” circular: componente sólido com dentes internos.

O redutor harmônico apresenta a menor relação torque-peso dentre os três redutores descritos, porém, se considerarmos apenas um único estágio de redução, a relação torque-peso dos redutores planetário e cicloidal é também muita pequena ^[04].

Figura 3– Partes que compõem o redutor Harmônico

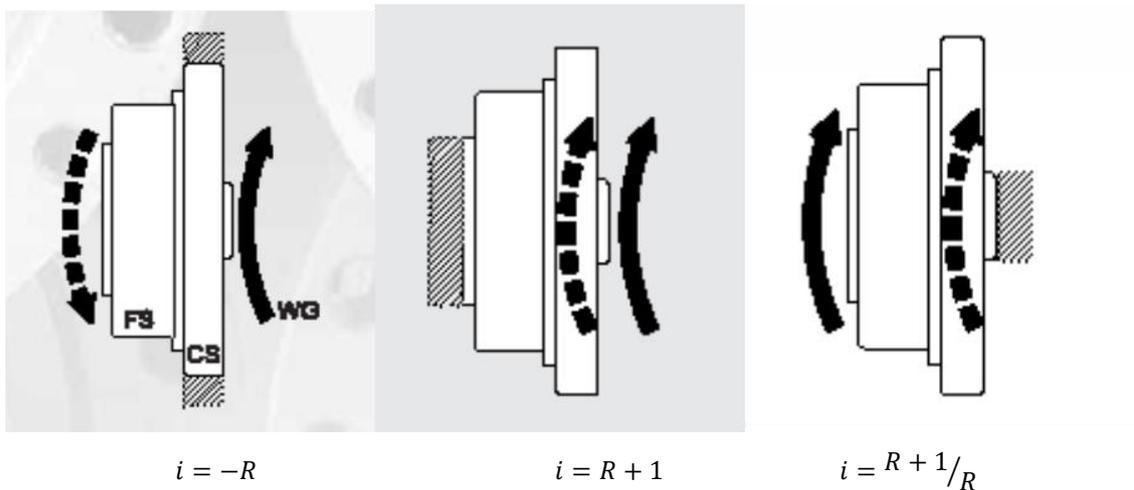


Fonte: adaptada de Directindustry ^[23].

Pelo princípio de funcionamento do redutor harmônico, o engrenamento ocorre ao longo do eixo maior da elipse, e a cada volta do gerador de onda move a *spline* flexível alguns dentes, sendo o número de dentes movidos iguais a diferença de dentes entre a *spline* flexível e a circular.

A relação de transmissão é calculada de acordo com a posição de montagem ilustrada na figura 4:

Figura 4– Posições de montagem o Redutor Harmônico



Fonte: edisciplinas^[06].

Sendo:

$$R = \frac{Z_r}{Z_r + Z_f} \quad (2)$$

Onde:

Z_r = número de dentes da Spline Circular.

Z_f = número de dentes da Spline Flexível.

Sua principal vantagem é a capacidade de altas reduções \Rightarrow de 30:1 até 320:1 em um único estágio.

Os principais fatores para não se optar pela fabricação deste modelo deve-se a questão de ter que fabricar componentes flexíveis com muitos dentes e adaptar um dispositivo capaz de fazer a função do gerador de onda e a limitação quanto a máxima rotação indicada para eixo de entrada, embora seja um projeto que seria interessante de se desenvolver a questão de se usar a impressão 3D para processo tão preciso, deixou de ser interessante quando comparado ao modelo escolhido para o protótipo.

1.1.3. Redutor cicloidal

Cicloide é uma curva traçada por um ponto na circunferência de um círculo menor que gira dentro da circunferência de um círculo fixo maior, e cicloidal é uma adjetivação de cicloide. Assim como palavras como helicoidal, sem-fim e esporão, cicloidal é um adjetivo genérico; apenas descreve o mecanismo de engrenagem dentro do redutor de velocidade. Nenhum fabricante deve reivindicar o uso exclusivo desta palavra ^[09].

A taxa de redução de um redutor cicloidal é calculada conforme (3) ou (4), para simples estágio e conforme (5) para duplo estágio;

$$i = \frac{n}{N-n} \quad (3) \quad i = \frac{d}{d_{cr}} \quad (4) \quad i = N \cdot n \quad (5)$$

Onde:

N = Número de pinos fixos da carcaça ou entrada;

n = Número de lóbulos em um disco cicloidal na saída do redutor;

d = Diâmetro do círculo base (primitivo);

d_{cr} = diâmetro do círculo rolante.

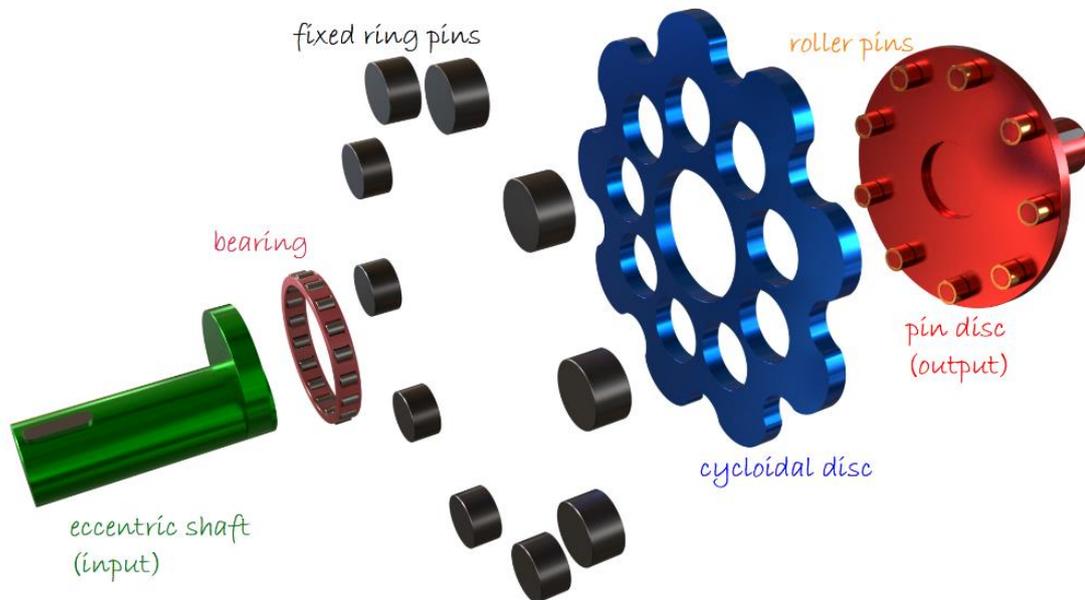
Por exemplo: conforme a figura 5 o número de pinos fixos da engrenagem de anel (N) é igual a 10, e o número de lóbulos (n) no disco cicloidal é igual a 9;

Aplicando os valores em (3) temos:

$$i = \frac{9}{10-9} \quad \therefore \quad i = 9 : 1$$

Nos modelos de duplo estágio para que a relação de transmissão se mantenha conforme (5), o número de lóbulos das engrenagens do 1º e 2º estágio não devem ter entre si um divisor comum, exceto o 1 (um), ou seja, devem ser primos entre si.

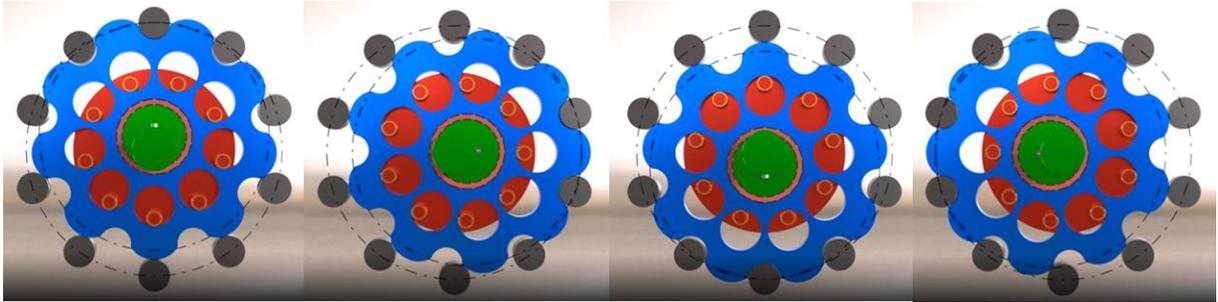
Figura 5– Exemplo cálculo da transmissão redutor cicloidal



Fonte: TECS^[08].

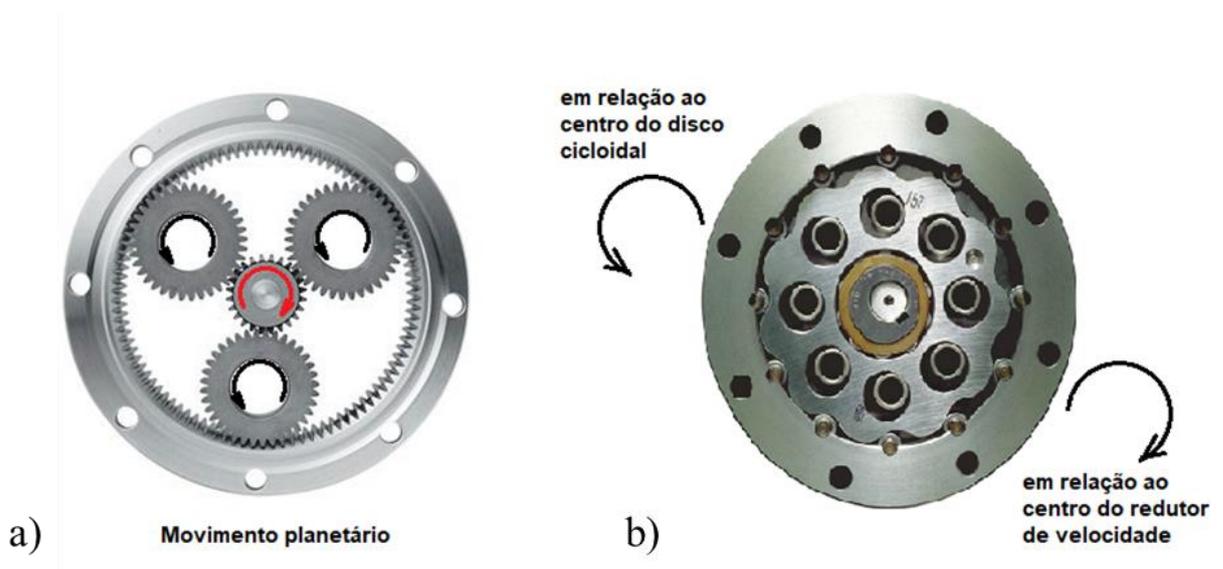
No funcionamento do redutor cicloidal ^[09] à medida que o eixo de entrada gira, o rolamento excêntrico entra em movimento de balanço. Esse movimento de balanço exerce uma força radial externa no disco cicloidal, ver figura 6, confinado dentro da caixa de engrenagens com pinos / rolos, o disco cicloidal entra em movimento planetário à medida que o rolamento excêntrico gira, ver figura 7b. Quando um círculo menor gira dentro da circunferência de um círculo maior, o círculo menor entra em movimento planetário. Em relação ao seu próprio centro, o círculo menor está girando na direção anti-horária, no entanto, em relação ao centro do círculo maior, o círculo menor está avançando na direção horária, ver figura 7a. O mecanismo cicloidal funciona da mesma maneira. O círculo menor, como descrito anteriormente, agora é quase tão grande quanto o círculo maior e tem a forma de um disco cicloidal. O círculo maior agora tem a forma de uma engrenagem de anel com pinos / rolos, ver figura 7b. Conforme o mancal excêntrico aciona o disco cicloidal, o disco cicloidal gira em uma direção em relação ao seu próprio centro. No entanto, o disco cicloidal avança na direção oposta em relação ao centro do redutor de velocidade. Esse movimento planetário parece quase o movimento oscilante dos bambolês.

Figura 6 - Movimento provocado pela força radial externa redutor cicloidal



Fonte: adaptado - *print's* de um vídeo ^[08].

Figura 7– Movimento planetário do redutor cicloidal



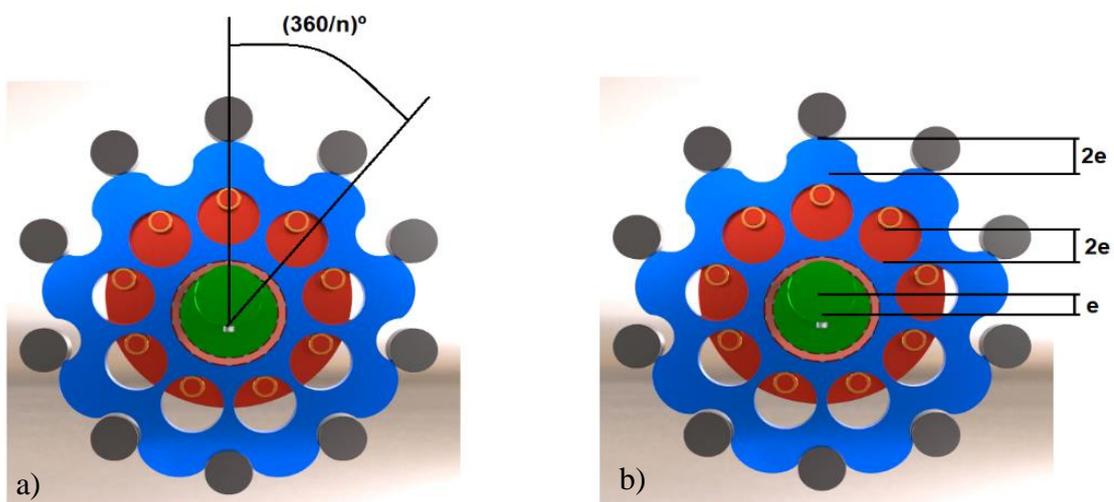
Fonte: adaptada ^[10] ^[24].

Enquanto o rolamento excêntrico gira uma rotação, o disco cicloidal avança na direção oposta em $(360/n)$ graus ou (N/n) passos de pinos / rolos, conforme figura 8a. A direção de saída do redutor cicloidal com redução de *estágio único* é igual ao oposto da direção de entrada.

Para converter o movimento oscilante de um disco cicloidal no movimento concêntrico suave do eixo de saída, vários rolos do eixo de saída são colocados dentro dos pequenos círculos de um disco cicloidal. Esses rolos também são conectados aos pinos do eixo de saída. A diferença ($2e$) entre o diâmetro do rolo do eixo de saída e o círculo pequeno é exatamente o dobro da excentricidade (e) do rolamento excêntrico. Essa distância ($2e$) também é a diferença radial entre o vale e a crista de um lóbulo de disco cicloidal, ver figura 8b.

Com o arranjo descrito acima, o mecanismo é capaz de converter o movimento de balanço de um rolamento excêntrico no movimento planetário oscilante de um disco cicloidal. Esse movimento é então transformado no movimento concêntrico suave do eixo de saída através dos rolos do eixo de saída. A redução de velocidade é alcançada e a transmissão de torque é realizada.

Figura 8– Movimento angular e excêntrico



Fonte: adaptado [08]

A eficiência de estágio único aproxima-se de 93% e o estágio duplo aproxima-se de 86%. Na linha de produtos da Sumitomo por exemplo as reduções de estágio único estão disponíveis comercialmente entre 3:1 a 119: 1, o estágio duplo de 104:1 a 7.569: 1, e ainda modelo com terceiro estágio com reduções de 8041:1 a 658503:1 [09] [10].

Com o objetivo de balancear o sistema de transmissão principalmente em altas velocidades, minimizar as vibrações, aumentar a vida útil dos discos quanto ao desgaste externo e preservar os rolamentos e componentes externos; dois discos cicloides costumam ser montados defasados em 180° , corrigindo o desequilíbrio estático.

O uso de dois discos defasados apesar de corrigir o desequilíbrio estático não elimina o desequilíbrio dinâmico que em muitas aplicações é aceitável, porém em unidades de alta velocidade podem ser utilizados três ou mais discos que corrigem o desequilíbrio e eliminam as vibrações.

Os acionamentos cicloidalis possuem folga muito baixa, alta rigidez a torção e são compactos, o que não se verifica nas caixas de engrenagens involutas. aplicados em condições que se exige baixa velocidade e alto torque. Os acionamentos cicloidalis podem ser projetados com áreas de contato significativamente maiores com relação a seu tamanho do que qualquer transmissão baseada em engrenagens elípticas, pelo menos 66% dos rolos da coroa e lóbulos do disco cicloidal compartilham a carga de choque sob compressão ^[11], permite uma saída de torque muito alta para o tamanho do acionamento.

Utilizou-se o processo de impressão 3D pela técnica FDM (*Fused Deposition Modeling*) na fabricação do protótipo do um minirredutor cicloidal de duplo estágio ao invés do tradicional processo de usinagem.

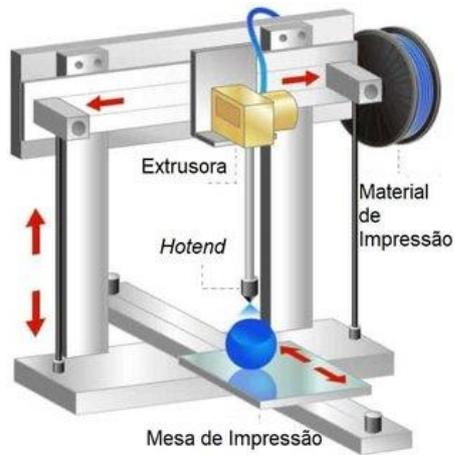
1.2. Impressão FDM (*Fused Deposition Modeling*)

O processo FDM é tipicamente a extrusão de filamentos de material termoplástico, a partir de um cabeçote extrusor que se move nos eixos X e Y, sobre uma plataforma de construção, formando a primeira camada do componente em fabricação. Após esse processo a plataforma que se move no eixo Z, é rebaixada na medida da espessura de camada da peça, então é depositada uma nova camada de material que se une com a anterior recém depositada. O procedimento se repete até o fim da construção do produto, podendo o equipamento ter mesa aquecida e também ter mais de um bico de injeção para deposição de outros materiais e material suporte.^[12]

Utilizou-se na construção do minirredutor o filamento TRITAN, que é produzido com copolímero de alta resistência mecânica e térmica, conforme especificações técnicas ^[13]; deve-se observar as diferentes direções de deposição de filamento de modo a melhorar a resistência à tração da peça acabada de acordo com a direção de solicitação do esforço ^[14].

A figura 9 mostra o esquema de funcionamento da impressão em FDM.

Figura 9- Modelo Esquemático Tecnologia FDM.

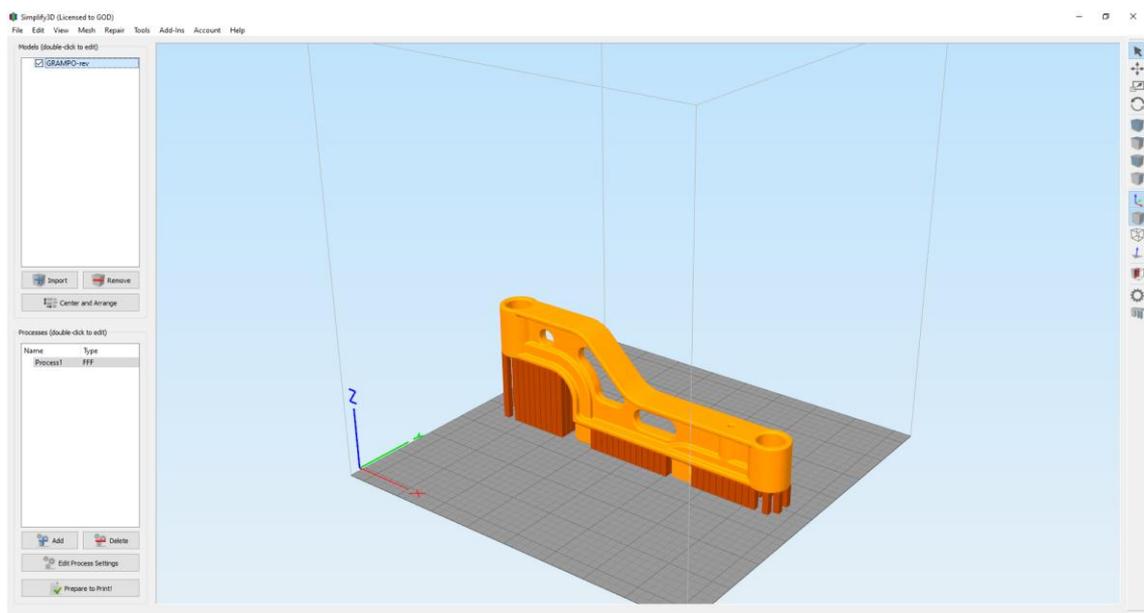


Fonte: publicação ^[15]

1.2.1. O software de fatiamento

O software de fatiamento de impressão 3D ^[16] controla todos os aspectos da impressão. Ele converte modelos 3D em instruções que a impressora entenda. Instruções melhores significam impressões melhores, portanto, uma simples atualização de software faz toda a diferença. O software de fatiamento a ser utilizado é o Simplify3D, imagem da tela principal ilustrada na figura 10;

Figura 10– Software Simplify3D



Fonte: Compilação do autor

2. JUSTIFICATIVA

A escolha pelo modelo cicloidal para a automatização do mecanismo de acionamento da cortina deve-se ao fato de identificar em sua mecânica uma geometria mais atraente para o processo de produção via impressão 3D e uma certa facilidade de obtenção dos componentes internos que basicamente são micro rolamentos, buchas e pinos, outrossim é devido as características mecânicas que apresentam ótimas vantagens dentre elas: Alta exatidão e repetibilidade, alta capacidade de torque, folga angular mínima entre o eixo de entrada e saída, altas taxas de reduções em dois estágios, ser compacto, silencioso e não reversível.

Para os desenvolvedores de produto principalmente profissionais da mecânica ligado a área de automação ter um processo que permita a construção de minirredutores sob demanda, amplia consideravelmente a flexibilidade para o desenvolvimento e produção de produtos e desenvolvimento de sistemas de acionamento.

Encontra-se respaldo para construção do protótipo do minirredutor cicloidal pelo processo de impressão 3D na publicação ^[12], que concluiu em seu trabalho a importância das tecnologias de prototipagem e ferramental rápido em processos de desenvolvimento de produtos e as vantagens fornecidas ao projetista quanto a competitividade, tempo de desenvolvimento, redução de custo e produtividade.

Ter um trabalho disponibilizado para amplo acesso aos interessados da área além de contribuir na difusão do conhecimento específico do equipamento amplia o leque de ferramentas disponíveis aos inventores, desenvolvedores de produtos e de sistemas de acionamento.

3. PROPOSTA E OBJETIVO

A proposta é construir o minirredutor modelo cicloidal de duplo estágio, com duas configurações no conjunto de engrenagens, que seja compacto e silencioso, acoplado a um motor de corrente contínua capaz de acionar o mecanismo do rolo de uma cortina persiana com dimensões: 0,82 m de largura e 2,50 m de comprimento e com peso aproximado de 1,4 kgf.

Ao fim do trabalho pretende-se ter as informações básicas necessárias para se produzir o minirredutor para o mecanismo de acionamento da cortina, construí-lo e realizar teste operacionais, especificamente como segue:

- a) Procedimento simplificado do traçado das engrenagens cicloidais de modo parametrizado usando ferramentas do SolidWorks;
- b) Modelagem 3d em software CAD 3D de todas as peças do projeto;
- c) Especificação técnica detalhada e lista de material completa com custo médio de aquisição dos componentes;
- d) Parâmetros básicos para impressão na técnica FDM utilizando o material TRITAN;
- e) Gerar relatórios com dados preliminares: rotação no eixo de saída e torque de saída.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Softwares:

- a) AutoCAD 2007, projeções e detalhamento;
- b) SolidWorks 2019, modelagem, montagem, simulação e gerar arquivo .STL;
- c) Simplify3D-4.0.0 – gerar o arquivo em linguagem de máquina o G-Code.

4.2. Equipamentos:

- a) Computador PC: sistema Operacional Windows 10 Pro, Processador Intel Core i7-4770 3,40 GHz, RAM 32 Gb, placa de vídeo GTX 1650 4Gb e SSD Kingston SA400S37/240G;
- b) IMPRESSORA 3D PRO - GTMAX3D CORE A2V2 ^[17];
- c) Ferramentas elétricas e manuais: retifica reta, furadeira, limas, chave Philips, chave de fenda, jogo de brocas, estilete e lixas;
- d) Equipamentos de ensaios mecânicos do laboratório do IFMG campus Betim: dinamômetro, balança de precisão, sensores fim de curso, contador de voltas ou outros similares que possam mensurar o torque e a velocidade.

4.3. Materiais:

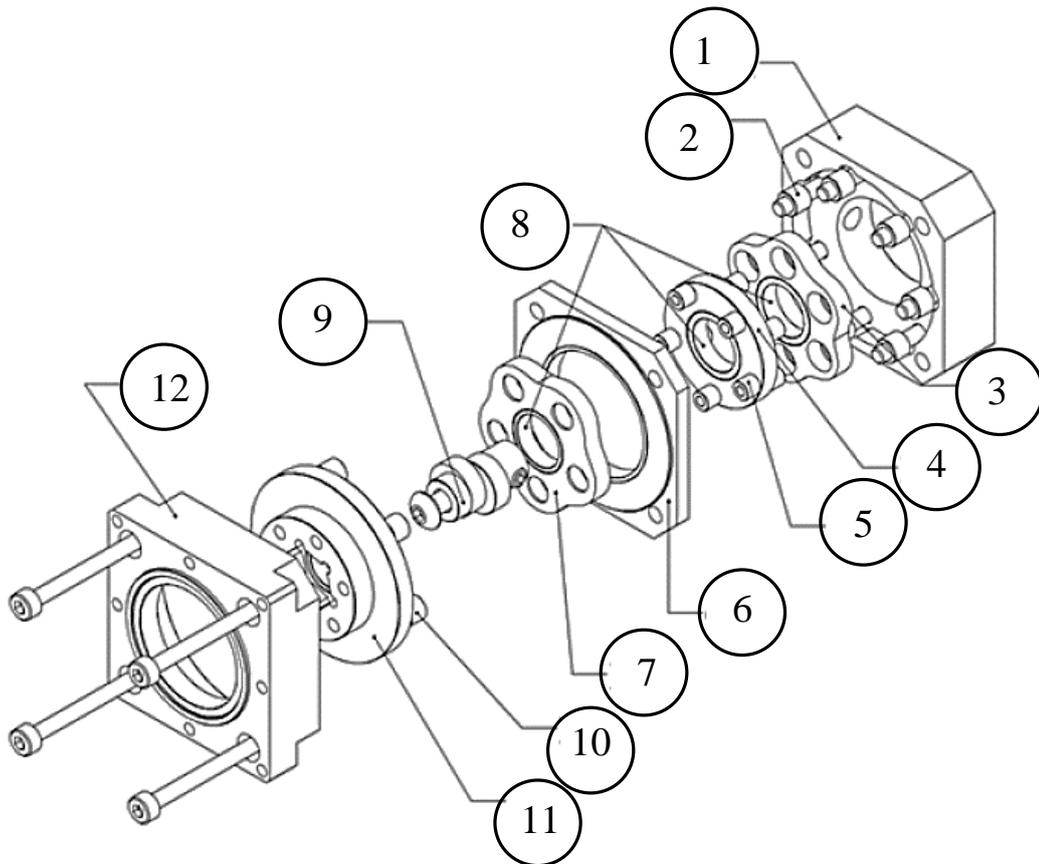
- a) Filamento TRITAN, de 1,75 mm para impressão 3D;
- b) Rolamento e Micro rolamentos – (6806-ZZ, MR148ZZ, MR84ZZ) ^[18];
- c) Motor de corrente contínua, 12 V, 5700 RPM ^[26];

- d) Vareta para Soldagem TIG em Aço inox AWS ER308L - 3,2 mm;
- e) Vareta Alumínio TIG Er4043 - 4,0 mm, barra quadrada 10x10 alumínio 6360;
- f) Lubrificante: Óleo lubrificante para máquinas multiuso e grafite em pó;
- g) Parafuso cabeça escareada M3x0,5x20 .

4.4.Método:

O foco principal é detalhar o projeto, a modelagem, a produção e a montagem de um mine redutor cicloidal de duplo estágio com redução de 120:1 e acoplá-lo a um motor de corrente contínua de 12 V, 5700 RPM, 78,8 gf.cm, 4,58 W e 63% de rendimento, o esquema do projeto segue muito próximo o ilustrado na figura 11, e nomenclaturas conforme quadro 01:

Figura 11- Esquema base para projeto do redutor cicloidal.



Fonte: Redutor cicloidal de 2 etapas, adaptado, baseado em ^[19]

Quadro - 01 – nomenclaturas

ITEM	DESCRIÇÃO	MATERIAL
01	Carcaça de Entrada	Tritan
02	Pinos fixos da carcaça de entrada	Tritan
03	Engrenagem cicloidal entra do 1º estágio	Tritan
04	Disco central 1º estágio	Tritan
05	Pinos do disco central/engrenagens cicloidais	Alumínio
06	Carcaça intermediaria	Tritan
07	Engrenagem cicloidal saída do 1º estágio	Tritan
08	Buchas/mancais de rolamento	Micro rolamentos MR148ZZ
09	Eixo excêntrico de entrada	Alumínio Er4043 e Tritan
10	Pinos do disco do segundo estágio	Aço inox ER308L
11	Disco/eixo de saída – acionamento	Tritan / Alumínio 6360
12	Carcaça de fechamento	Tritan

O tipo de engrenagem cicloidal adotada é o modelo: disco cicloidal com um cicloide contraído conforme animação em TECS^[08], o projeto foi desenvolvido de modo parametrizado usando ferramentas do software SolidWorks seguindo a metodologia adota na publicação ^[20];

Também foi fabricado um redutor com a caixa de engrenagens dupla, utilizando-se duas engrenagens de entrada e duas de saída, sem a utilização do disco central, fazendo a conexão direta entre 1º e segundo estágios, e foi avaliado os resultados dos dois modelos.

No primeiro momento visando menor tempo de produção os pinos fixos de entrada do 1º estágio foram impressos diretamente na carcaça, mas em uma hipótese de melhoria quanto ao atrito entre as peças ou na resistência ao desgaste, pode-se optar por utilizar a estratégia de imprimir as sedes e montar pinos em aço inox como feito no disco de saída.

No eixo de saída utilizou-se um perfil de alumínio de seção quadrada, e os pinos do disco de saída em aço inox fixados nas sedes impressas na peça.

4.4.1. Cálculos básicos para confirmação do dimensionamento do redutor

Partindo dos dados do peso da cortina de 1,418 kgf, e do diâmetro externo de 34 mm do tubo de alumínio a qual a mesma é enrolada, procede-se ao cálculo do torque ^[21] mínimo necessário para elevação da cortina:

$$M = F_t \cdot R \quad (6)$$

Onde:

M = Momento da força (kgf.mm);

F_t = Força tangencial (força peso = 1,418 kgf);

R = Raio do tubo (raio = 17mm);

O torque mínimo necessário ao sistema é de **24,11 kgf.mm**.

Dados do motor (valores aproximados):

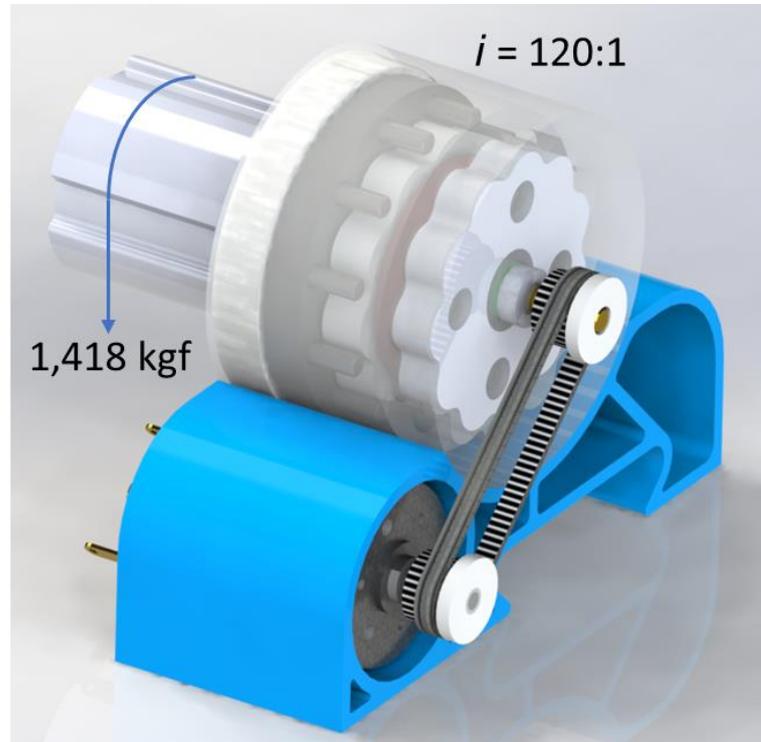
Rotação: 5700 RPM, Potência: 4,58 W, Rendimento: 63% ^[25];

Devido a uma maior facilidade e flexibilidade de construção o conjunto minirredutor cicloidal terá um acionamento primário por correia sincronizadora; realizou-se uma estimativa do rendimento geral do conjunto levando em conta alguns fatores: correias sincronizadoras possuem uma eficiência entre 97 e 99% ^[05], porém pelo fato de que se utilizar tal correia soldada/colada será considerado uma eficiência de apenas 80%, já o para minirredutor cicloidal propriamente dito a eficiência considerada também será de 80% pelo fato de estar sendo construído com peças plásticas impressas e ajustes manuais de montagem.

Relacionado as eficiências estimadas em 80% para a transmissão e de 80% para o minirredutor, o rendimento total esperado para o conjunto é de apenas 64%.

O minirredutor foi fabricado seguindo um fator de redução de 120:1, com 12 pinos fixos na entrada e uma engrenagem de saída com 10 lóbulos, pode-se verificar o arranjo geral da relação de transmissão conforme ilustra a figura 12.

Figura 12 – Relação de transmissão do minirredutor cicloidal



Fonte: Desenvolvimento próprio

Com a construção do minirredutor seguindo os parâmetros até aqui selecionados espera-se obter na saída uma rotação 120 vezes menor que a de entrada, ou seja, **47,5 RPM** e encontrar um torque na ponta do eixo de saída conforme segue:

Cálculo do torque esperado ^[21]:

$$M = 973 \cdot P/n \quad (7)$$

Onde:

M = Momento da força (kgf.mm);

P = Potência (W);

n = Rotação (RPM);

$$M = 973 \cdot 2,88/48$$

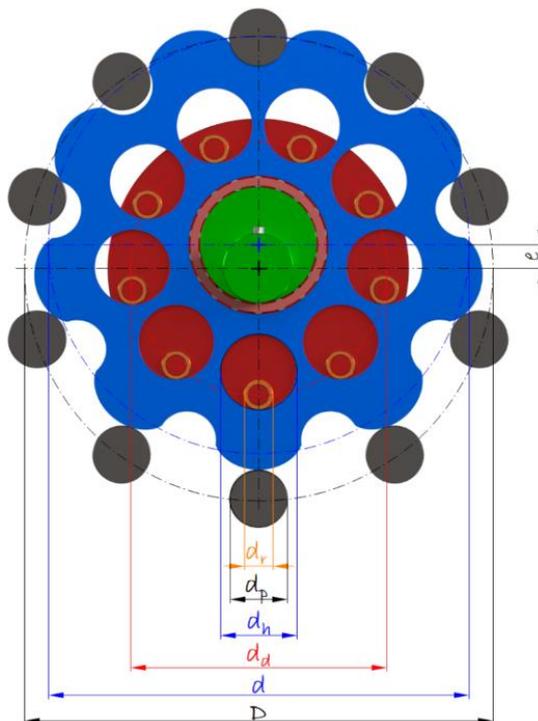
$$M = 58,38 \text{ kgf} \cdot \text{mm}$$

Aplicou-se a potência do motor o rendimento de 63% informado anteriormente, e ao resultado deve-se aplicar o rendimento do sistema mecânico que está previsto em 64%, chegamos ao valor esperado de **37,36 kgf.mm**, que é um valor suficiente para elevar a cortina, após a fabricação e montagem do minirredutor foi realizada a medição desse momento.

4.4.2. Procedimento de parametrização da engrenagem cicloidal

Dados para parametrizar a engrenagem cicloidal ^[08] [20], para se ter um melhor entendimento de todas as variáveis envolvidas no projeto da engrenagem cicloidal e seguir passo a passo com o processo de parametrização é necessário primeiramente identificar cada uma dessas variáveis, conforme segue na figura 13.

Figura 13- Identificação das variáveis do engrenamento cicloidal.



(Var. arbitrárias escolher com sensatez)

D = diâmetro de referência dos pinos fixos do anel;

d_p = diâmetro do pino fixo;

N = número de pinos fixos;

d_r = diâmetro dos pinos da engrenagem;

dd = diâmetro base dos furos para os pinos do disco;

N_f = número de furos no disco;

e = excentricidade do disco cicloidal

(variáveis derivadas)

i = Relação de transmissão;

d_{cr} = diâmetro do círculo rolante;

d = diâmetro do círculo base (rotativo) da engrenagem;

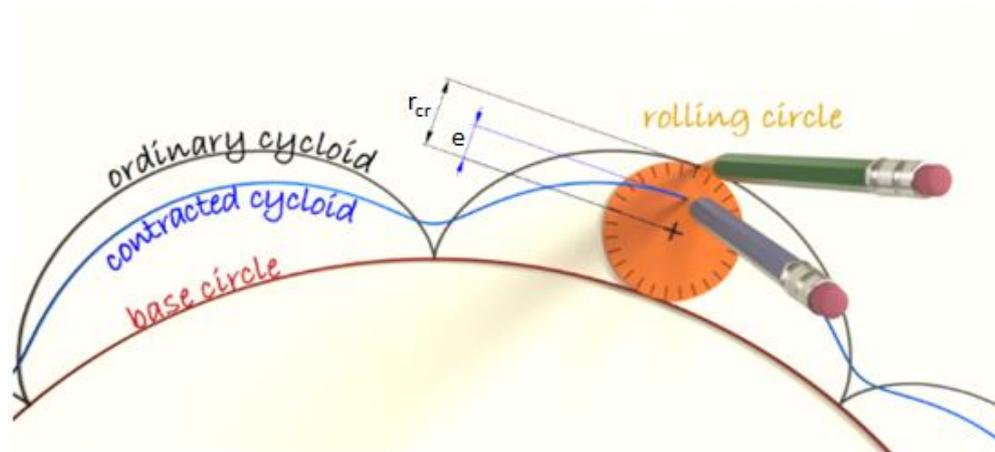
n = número de lóbulos;

d_h = diâmetro do furo dos pinos da engrenagem;

Fonte: TECS^[08].

A figura 14 mostra exatamente o formato do traçado do cicloide contraído em comparação com o cicloide padrão, a redução do cicloide padrão para o contraído é diretamente relacionada com a excentricidade marcada no círculo rolante que percorre o círculo base, adiante está descrito a relação matemática que envolve estes elementos.

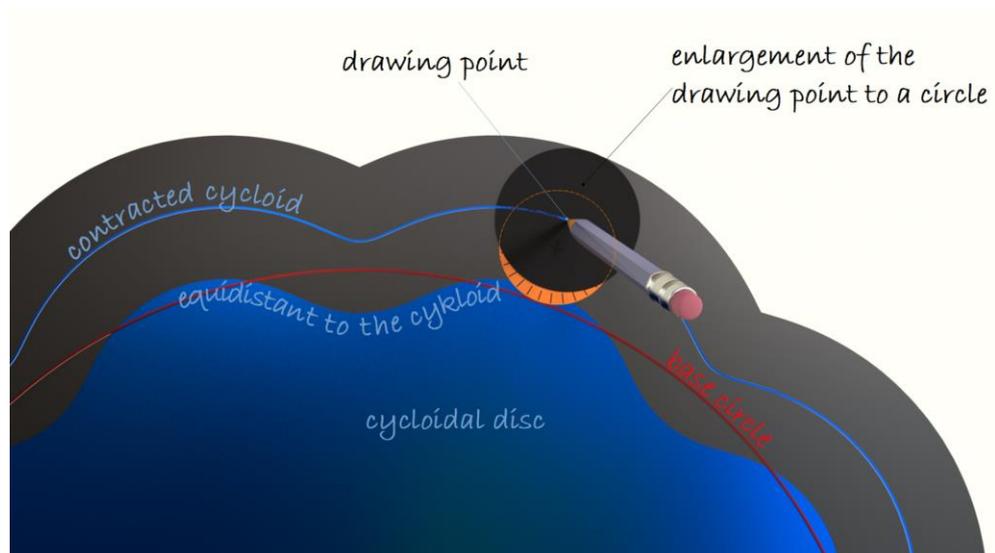
Figura 14- Traçado das linhas de base do disco cicloidial



Fonte: TECS^[08].

Tomando como base o traçado do cicloide contraído se pode ver o seu real efeito sobre a forma final do disco cicloidial, que é obtida subtraindo do cicloide contraído o raio dos roletes fixos, percorrendo o traçado conforme mostrado na figura 15.

Figura 15- Traçado do cicloide contraído e geração do disco cicloidial contraído



Fonte: TECS^[08].

Cálculo do diâmetro do círculo rolante (d_{cr}) e do círculo base (d); a circunferência do círculo rolante é exatamente o passo dos pinos fixos.

$$d_{cr} = D/N \quad (08)$$

Manipulando (04) e (08) temos:

$$d = i \cdot D/N \quad (09)$$

O diâmetro do furo dos pinos da engrenagem (d_h) é igual ao diâmetro dos pinos da engrenagem (d_r) somado ao dobro do valor da excentricidade (e).

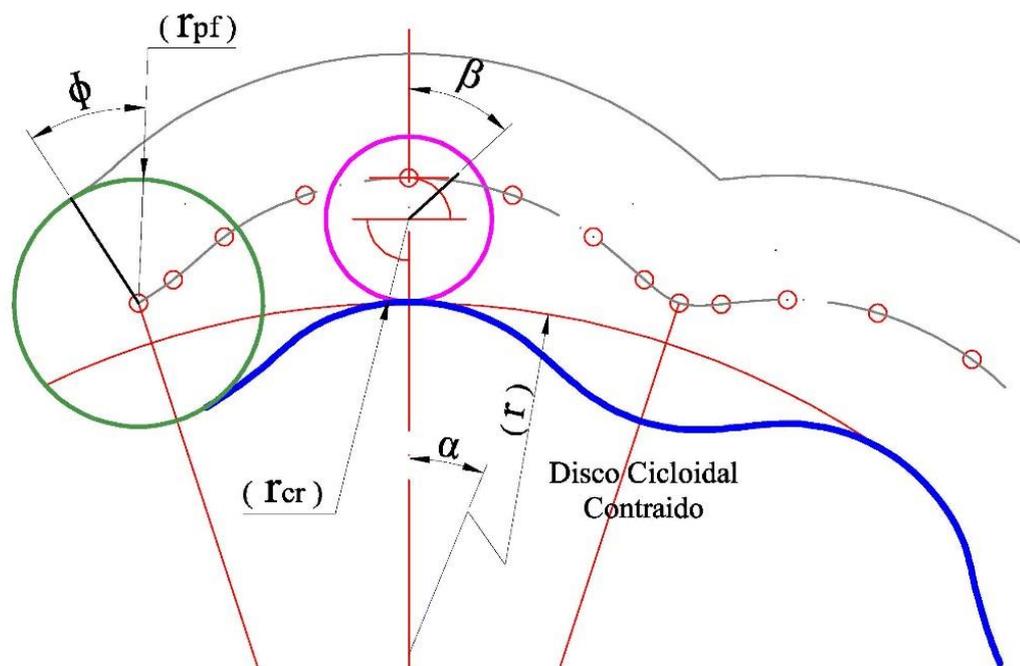
$$d_h = d_r + (2 \cdot e) \quad (10)$$

Considerando:

$$\frac{d}{2} = r \quad ; \quad \frac{d_{cr}}{2} = r_{cr} \quad e \quad \frac{d_p}{2} = r_{pf} \quad ;$$

Os raios e movimentos que compõem a equação da parametrização ^[20], estão ilustradas na figura 16.

Figura 16 – Identificação dos raios e ângulos para parametrização



Fonte: desenvolvida baseada na publicação ^[20].

E substituindo as variáveis indicadas na figura 16 nas equações de parametrização [20] temos:

$$x = (r + r_{cr}) \cdot \cos\alpha + e \cdot \cos(\alpha + \beta) - r_{pf} \cdot \cos(\alpha + \varphi) \quad (11)$$

$$y = (r + r_{cr}) \cdot \sin\alpha + e \cdot \sin(\alpha + \beta) - r_{pf} \cdot \sin(\alpha + \varphi) \quad (12)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{r}{r_{cr}} \cdot \alpha \quad (13)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\beta}{\frac{r_{cr}}{e} + \cos\beta}\right) \quad (14)$$

Substituindo (13) em (14);

$$\varphi = \tan^{-1}\left[\frac{\sin\left(\frac{r}{r_{cr}}\alpha\right)}{\frac{r_{cr}}{e} + \cos\left(\frac{r}{r_{cr}}\alpha\right)}\right] \quad (15)$$

Substituindo (13) e (15) em (11) e (12).

$$x = (r + r_{cr}) \cdot \cos\alpha + e \cdot \cos\left[\alpha + \left(\frac{r}{r_{cr}}\alpha\right)\right] - r_{pf} \cdot \cos\left\{\alpha + \left\{\tan^{-1}\left[\frac{\sin\left(\frac{r}{r_{cr}}\alpha\right)}{\frac{r_{cr}}{e} + \cos\left(\frac{r}{r_{cr}}\alpha\right)}\right]\right\}\right\} \quad (16)$$

$$y = (r + r_{cr}) \cdot \sin\alpha + e \cdot \sin\left[\alpha + \left(\frac{r}{r_{cr}}\alpha\right)\right] - r_{pf} \cdot \sin\left\{\alpha + \left\{\tan^{-1}\left[\frac{\sin\left(\frac{r}{r_{cr}}\alpha\right)}{\frac{r_{cr}}{e} + \cos\left(\frac{r}{r_{cr}}\alpha\right)}\right]\right\}\right\} \quad (17)$$

As equações (16) e (17) devem ser trabalhadas para um formato que a ferramenta, curva acionada por equação, do *SolidWorks* possa processar e gerar a curva que será o contorno da engrenagem cicloidial.

4.4.3. *Processando dados iniciais em uma planilha do Excel:*

Uma planilha auxiliar do Excel deve ser utilizada para processar previamente os dados de entrada e fornecer os valores necessários as equações (16) e (17), conforme Tabela 1.

Tabela 1-Planilha de cálculos para parametrização

DADOS DE ENTRADA E CÁLCULO DAS VARIÁVEIS NECESSÁRIAS A CONTRUÇÃO DA ENGRENAGEM CICLOIDAL		
<i>Variáveis de entrada</i>	VALOR	Unid.
D = diâmetro do círculo de referência dos pinos fixos do anel	40,00	mm
d _p = diâmetro do pino fixo	3,00	mm
r _{pf} = Raio do pino fixo	1,50	mm
N = número de pinos fixos	12	Unid.
d _r = diâmetro dos pinos da engrenagem	3,20	mm
d _d = diâmetro do círculo base dos furos para os pinos do disco	25,00	mm
N _f = número de furos no disco	4	Unid.
e = excentricidade do disco cicloidal	1,00	mm
<i>variáveis derivadas</i>		
i = Relação de transmissão;	11	Unid.
r _{cr} = Raio do círculo rolante;	1,66̄	mm
r = Raio do círculo base (rotativo) da engrenagem;	18,33̄	mm
n = número de lóbulos;	11	Unid.
d _h = diâmetro do furo dos pinos da engrenagem;	5,20	mm

$$x = (r + r_{cr}) \cdot \cos \alpha + e \cdot \cos \left[\alpha + \left(\frac{r}{r_{cr}} \cdot \alpha \right) \right] - r_{pf} \cdot \cos \left\{ \alpha + \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{\sin \left(\frac{r}{r_{cr}} \cdot \alpha \right)}{\frac{r_{cr}}{e} + \cos \left(\frac{r}{r_{cr}} \cdot \alpha \right)} \right] \right\} \right\}$$

$(r + r_{cr})$	20
r/r_{cr}	11
r_{cr}/e	1,6667

$$X_t = 20 \cdot \cos(t) + 1 \cdot \cos(t + (11 \cdot t)) - 1.5 \cdot (\cos(t + (\arctan((\sin(11 \cdot t)) / (1.6667 + \cos(11 \cdot t))))))$$

$$Y_t = 20 \cdot \sin(t) + 1 \cdot \sin(t + (11 \cdot t)) - 1.5 \cdot (\sin(t + (\arctan((\sin(11 \cdot t)) / (1.6667 + \cos(11 \cdot t))))))$$

Parâmetro: $0 \leq t < 2\pi$

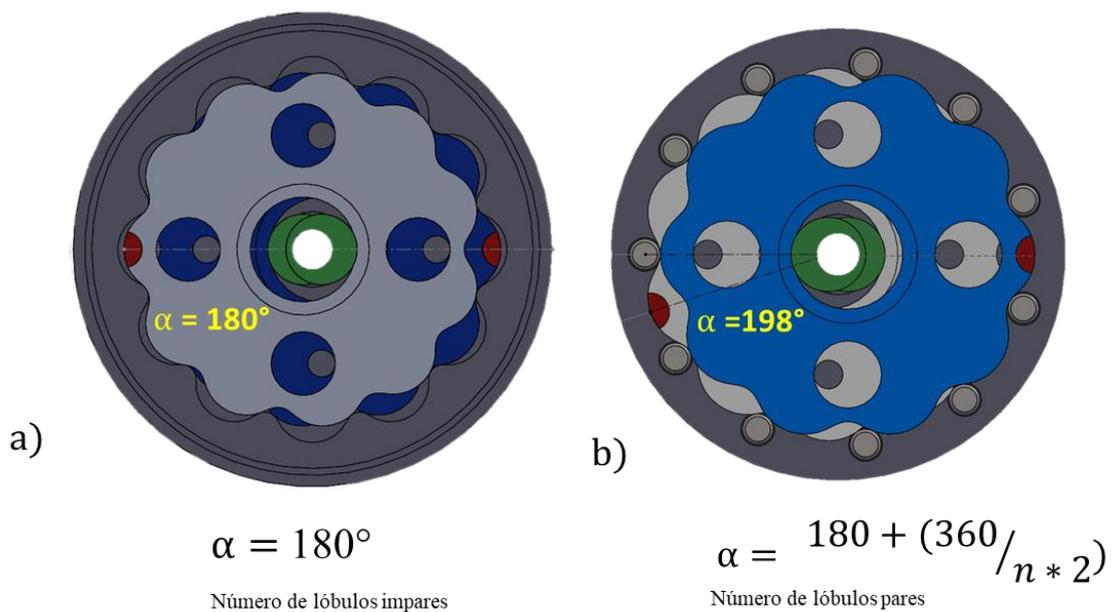
Fonte: Desenvolvimento próprio

4.4.4. Modelagem do minirredutor cicloidal

Com o auxílio da planilha identificada na Tabela 1 pode se projetar a caixa de engrenagens conforme previsto; para o modelo-01 proposto e detalhado no ANEXO 01 não há observações relevantes quanto ao posicionamento e esquema de montagem interna da caixa de engrenagens, porém para o modelo-02 proposto e detalhado no ANEXO 02 uma observação relevante é relacionada ao aumento no diâmetro dos furos dos discos relativo a excentricidade e ao detalhamento da posição dos furos dos discos cicloidalis relativos à sua posição de montagem.

Com relação a excentricidade o valor de $2e$ indicado na figura 8b passa a ser de $4e$, e em relação a defasagem entre as posições segue conforme ilustrado na figura 17.

Figura 17- disposição dos discos cicloidalis



Fonte: Desenvolvimento próprio

Identificação: 17a- discos do 1º estágio; 17b discos do 2º estágio.

A regra para realizar a defasagem dos ângulos indicados na figura 17 segue dois parâmetros similares.

Quando o número de lóbulos dos discos cicloidais for ímpar, conforme figura 17a os furos dos discos deverão ser girados 180° em relação a referência que é o ponto vermelho indicados na figura 17 e Quando o número de lóbulos dos discos cicloidais for par, conforme figura 17b um incremento é necessário ao ângulo de 180° conforme indicado em (18).

$$\alpha = 180 + (360^\circ / n * 2) \quad (18)$$

onde:

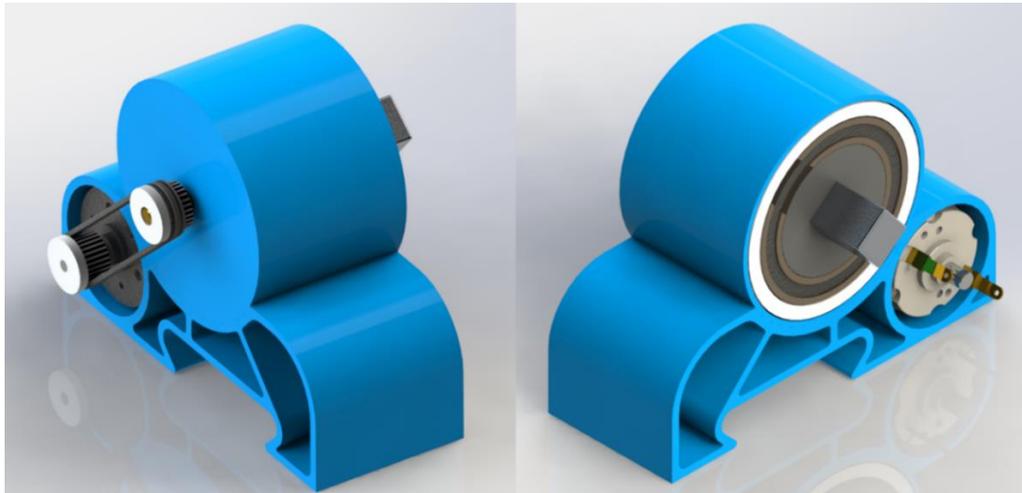
α = Ângulo de defasagem;

n = Número de lóbulos do disco cicloidal.

Os furos dos discos de saída do 1º estágio e entrada do 2º estágio devem ser inseridos na montagem exatamente concêntricos.

Foi incorporado a base um alojamento para o motor e outro para um suporte de fixação, objetivando um modelo compacto e funcional, a figura 18 mostra uma vista geral do minirredutor totalmente montado.

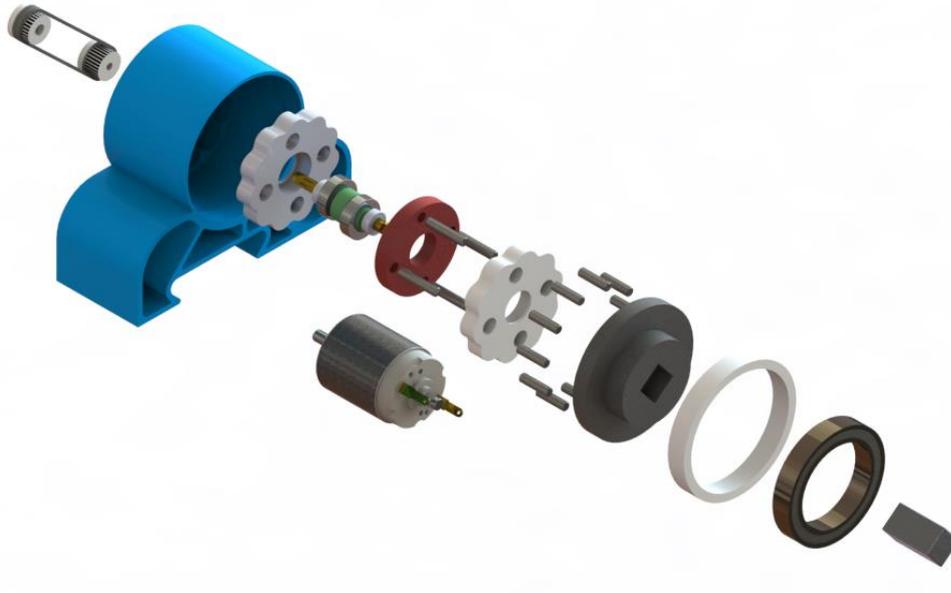
Figura 18- Perspectiva do projeto do minirredutor cicloidal



Fonte: Desenvolvimento próprio

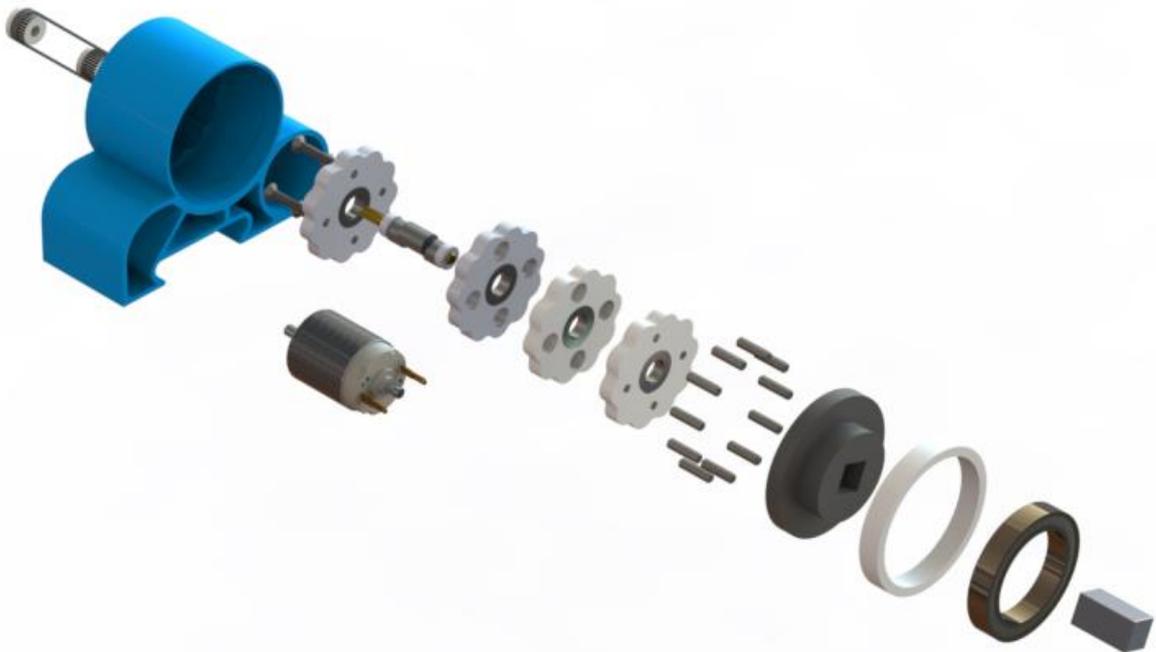
No ANEXO 01 e ANEXO 02 pode-se identificar todas as peças em uma vista explodida, e uma lista de materiais detalhada, as figuras 19 e 20 ilustram a vista explodida dos componentes, onde pode ser observada claramente a diferença entre as caixas de engrenagens e o tipo de montagem a ser realizado.

Figura 19- Vista explodida do minirredutor cicloidal 120:1 – modelo-01



Fonte: Desenvolvimento próprio

Figura 20-Vista explodida do minirredutor cicloidal 120:1 – modelo-02



Fonte: Desenvolvimento próprio

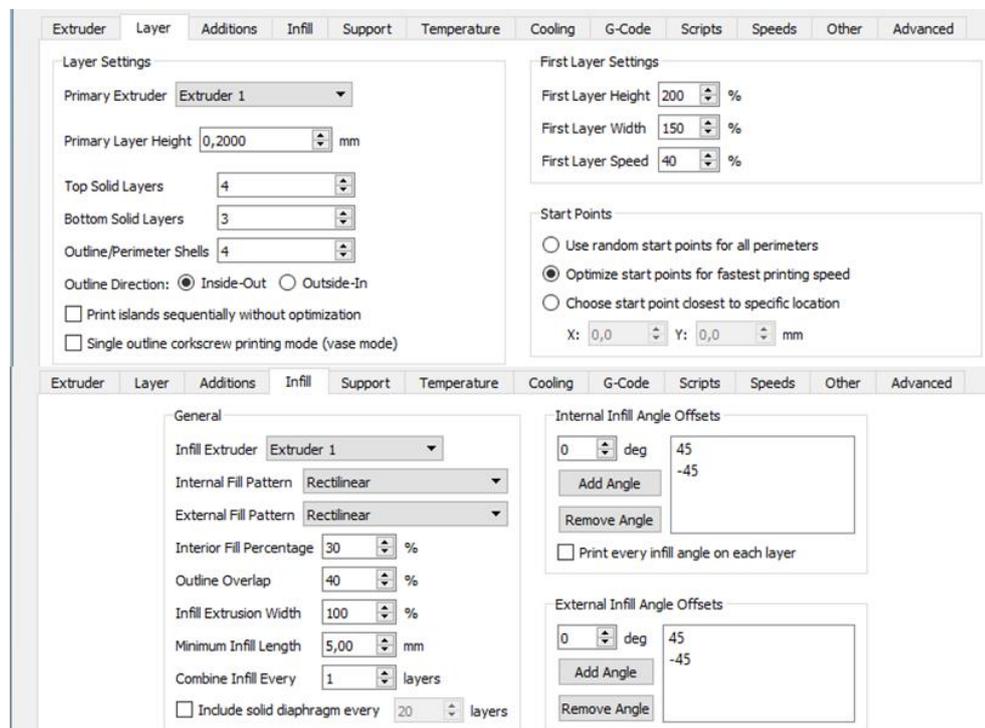
4.4.5. Parâmetros básicos para impressão;

Para a impressão dos componentes foi utilizada uma configuração padrão, com pequenos ajustes na velocidade de impressão de acordo com a escala e geometria da peça a ser imprimida:

- Altura de camada: 0,2 mm;
- Casca: 4 (quatro);
- Preenchimento: 30%;
- Temperatura da mesa: 100° C;
- Temperatura de extrusão: 270° C 1ª camada e 262° C nas demais;
- Velocidade de impressão: 30 a 80 mm/s.

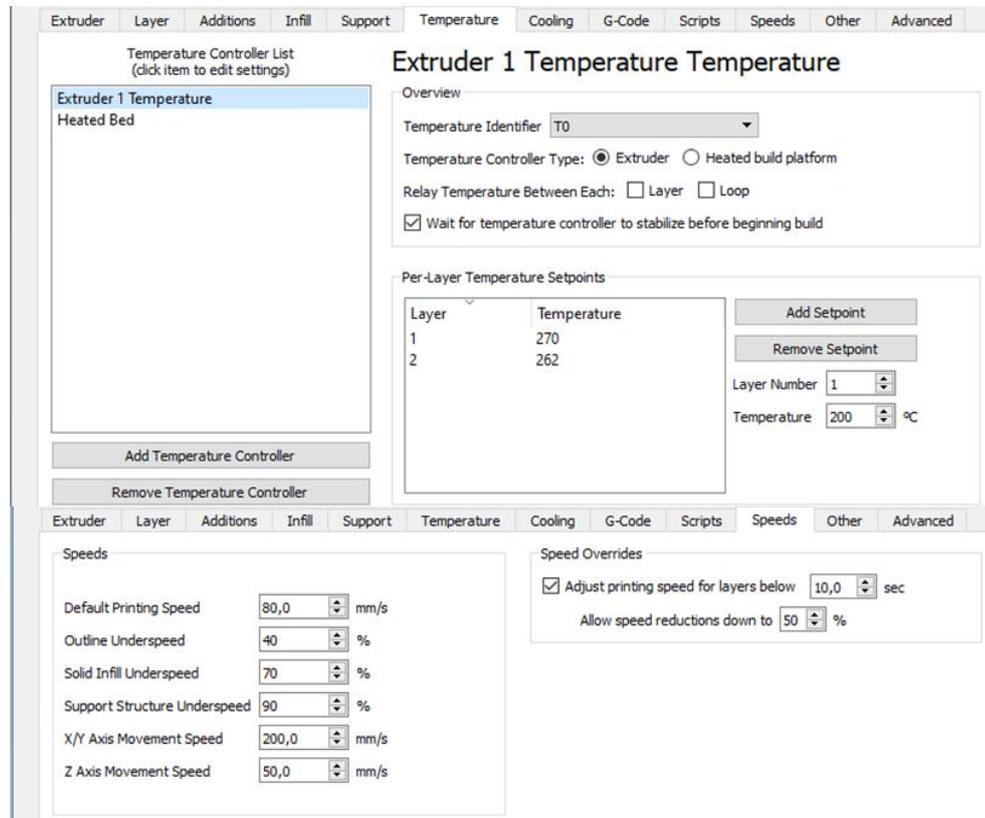
As figuras 21 e 22 ilustram as configurações básicas utilizadas.

Figura 21-Configurações de impressão – 1



Fonte: compilação do autor

Figura 22-configurações de impressão-2



Fonte: compilação do autor

4.4.6. Preparação das peças impressas e montagem do conjunto

Após conclusão da fabricação das peças é realizada uma inspeção dimensional e visual minuciosa, afim de detectar rebarbas, falhas na impressão ou medidas com interferências que possam causar algum problema no funcionamento do conjunto, alguns furos devem ser calibrados com uso de brocas para os ajustes finais.

Na carcaça estão incorporados os pinos fixos que foram impressos de forma integral e o rolamento MR84, Todas as engrenagens podem ser montadas em um subconjunto que facilita a montagem final, observando as figuras 23 e 24, do modelo 01, verificamos que a montagem das engrenagens e do disco central é de fácil execução e cada engrenagem tem um rolamento MR148 e que o disco central não possui rolamento, o contato é de plástico com plástico, os pinos fixos do disco de saída são em aço inox AISI-308L, fabricados a partir de varetas de soldagem.

Figura 23- Carcaça completa e componentes do conjunto de engrenagens – modelo-01



Fonte: compilação do autor

Figura 24- Carcaça, conjunto de engrenagens, e disco de saída – modelo-01



Fonte: compilação do autor

Nas figuras 25 e 26 do modelo-02, pode-se constatar que tanto o primeiro quanto o último disco possuem roscas conforme parafuso de ligação M3x20, outra observação importante é que o excêntrico vai montado em um eixo de alumínio e deve ser impresso bipartido para permitir a montagem dos discos centrais, em cada disco é montado um rolamento MR148.

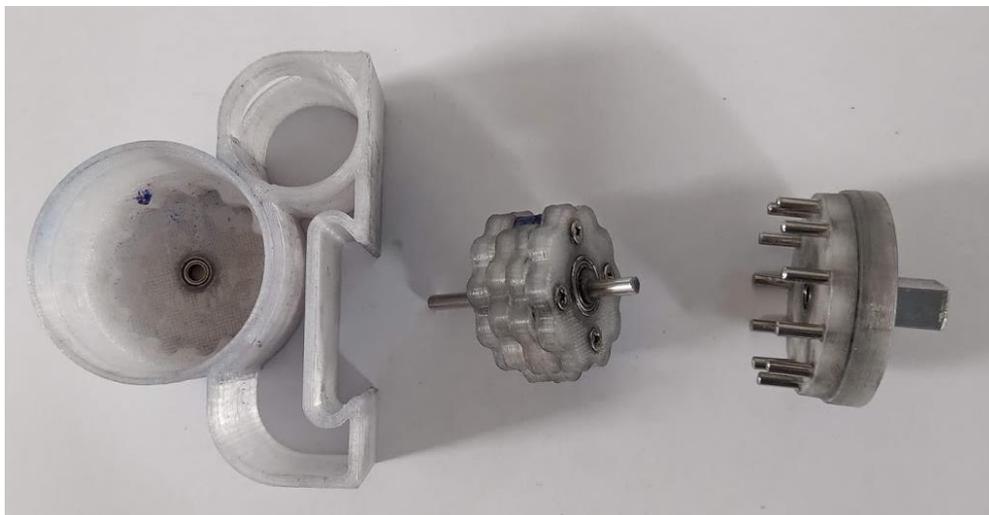
Figura 25- Carcaça completa e componentes do conjunto de engrenagens – modelo-02



Fonte: compilação do autor

A figura 26 mostra a montagem do conjunto de engrenagens neste caso os parafusos M 3x20 fazem a ligação entre o primeiro e segundo estágios, o disco de saída e acoplado a um rolamento 6806, e o eixo de saída é em perfil quadrado de alumínio.

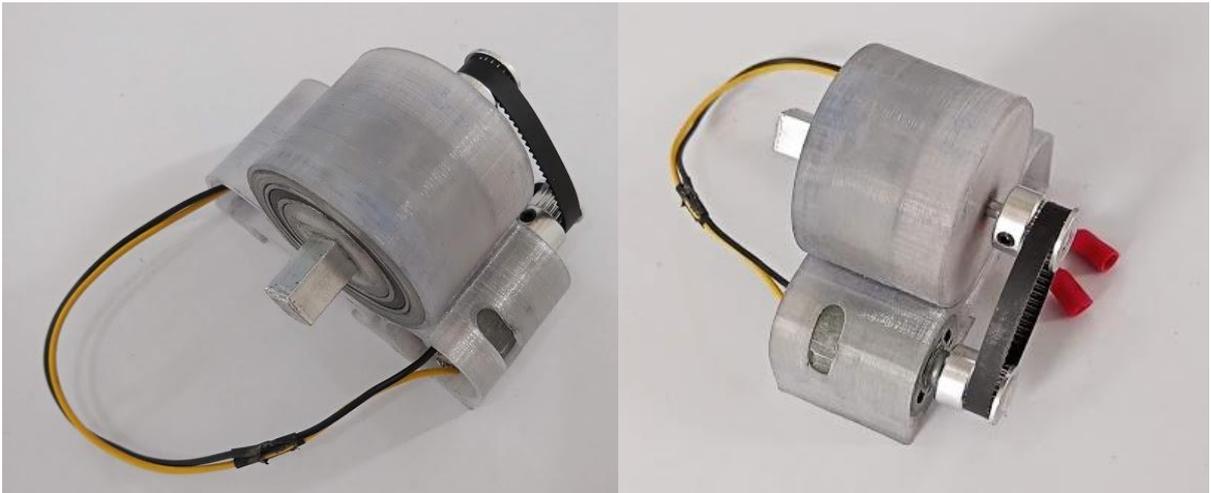
Figura 26- Carcaça, conjunto de engrenagens, e disco de saída – modelo-02



Fonte: compilação do autor

Após concluir a montagem dos subconjuntos os mesmos foram lubrificados com uma fina camada de óleo e impregnados com grafite, após o procedimento de lubrificação o minirredutor pode ser fechado e concluir a montagem com a instalação do motor e do conjunto de polias e correia sincronizadora, a figura 27 mostra o minirredutor em sua forma final totalmente montado.

Figura 27- Minirredutor cicloidal completo



Fonte: compilação do autor

5. CUSTO DE FABRICAÇÃO

Conforme ANEXO 01 e ANEXO 02, foi realizado o levantamento do custo dos materiais necessários para confecção do minirredutor cicloidal, neste caso o modelo escolhido para determinação do custo foi o modelo detalhado no ANEXO 02, por se tratar de um modelo com um maior número de componentes, a tabela 2 detalha o custo médio dos componentes e um custo final aproximado, uma vez que alguns componentes podem ser adquiridos sem custo ou provenientes de aproveitamento de materiais reutilizados.

Deve-se considerar na avaliação do custo total final que a fabricação se trata de um protótipo, ou seja, não tem escala de fabricação e tem a vantagem de ser dimensionado conforme necessidade do projetista.

Tabela 2- Custo médio dos materiais do minirredutor cicloidal

ITEM	DESCRIÇÃO	MATERIAL	UNID.	QT	R\$ / kg	R\$ PARCIAL
1	CARCAÇA	TRITAN	g	100 ^(b)	R\$ 180,40	R\$ 18,04
2	BASE					
3	DISC-CICLO-11x1-E					
4	DISC-CICLO-11x1-S					
5	DISC-CICLO-10X1-E					
6	DISC-CICLO-10X1-S					
8	DISCO SAIDA					
10	EXCENTRICO					
11	BUCHA CENTRALIZADORA					
7	CAB. ESC. - M3X0.5X20	AÇO	Unid.	4	R\$ 0,50	R\$ 2,00
9	PINO FIXO-SAIDA	AISI-308L	Unid.	11	R\$ 0,05	R\$ 0,55
12	EIXO-SAIDA	ALUMÍNIO	Unid.	1	R\$ 0,50	R\$ 0,50
13	EIXO - dn-4 mm	ALUMÍNIO	Unid.	1	R\$ 0,05	R\$ 0,05
14	rolamento - mr148zz_0	AÇO	Unid.	4	R\$ 4,24	R\$ 16,94
15	rolamento - 6806 -ZZ	AÇO	Unid.	1	R\$ 14,00	R\$ 14,00
16	rolamento - mr84zz_0	AÇO	Unid.	2	R\$ 4,95	R\$ 9,90
17	MOTOR-12V-6000 RPM	PADRÃO	Unid.	1	R\$ 9,00	R\$ 9,00
18	CONJUNTO-POLIA-CORREIA	ALUM./BORRACHA	Unid.	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
TOTAL GERAL						R\$ 80,98

(a) Os itens pesam 100 g, no total.

Fonte: Compilação do autor

6. RESULTADOS DOS TESTES E DISCURSÕES

Conforme proposto os testes têm como objetivo confirmar se o conjunto possui o torque necessário para elevar a cortina e se o torque máximo calculado realmente será atingido pelo minirredutor cicloidal, além de avaliar o comportamento dos dois modelos e as principais particularidades de cada um, após a confirmação e avaliação dos dados o motorredutor escolhido será montado na cortina e realizado o teste funcional.

Na execução dos testes foi utilizada uma fonte de alimentação de 12V e 2,5 A, ligada diretamente ao motor passando apenas por um interruptor.

6.1. Medição da velocidade angular no eixo de saída [RPM]

A tabela 3 apresenta os resultados encontrados para o número de voltas em rotações por minuto (RPM) dos dois modelos construídos, a rotação foi determinada com auxílio de um dispositivo mecânico e outro eletrônico que usa um sensor ótico reflexivo ligado a um microcontrolador Arduino modelo Nano e a contagem é registrada em um display de LCD, conforme mostrado na figura 29, o sistema de medição tem capacidade de medir os pulsos a cada 180° de deslocamento angular e foi programado para contar as voltas por 180 segundos e então o valor encontrado foi dividido por 6 e registrado na tabela 4.

Para minimizar variações devidas ao sistema de transmissão por correia e ao motor utilizado, foram utilizados exatamente o mesmo motor e o mesmo sistema de transmissão nos dois modelos.

Tabela 3- rotação no eixo de saída

MODELO	Rotação Prevista	Contagem 180° (180 s)	Rotação Real (RPM)
01	47,5	294	49
02	47,5	300	50

Fonte: próprio

Figura 28-sistema de medição da rotação



Fonte: compilação do autor

Pode-se observar na Tabela 3 que a rotação de saída é ligeiramente maior que a rotação calculada em 4.4.1 para o sistema, isso deve-se ao fato dos minirredutores estarem bem ajustados sem interferências internas, portanto o motor trabalhando livre fornece ao sistema uma rotação ligeiramente maior que 5700 RPM, observa-se também uma diferença muito sutil entre os modelos, por volta de 2%, no número de rotações isso pode estar relacionado a eficiência de cada modelo pois internamente os mesmos tem forma construtiva distintas para o conjunto de engrenagens, neste ponto ainda é cedo para afirmar com certeza que o modelo 02 é mais eficiente que o modelo 01 levando-se em conta apenas estes dados.

6.2. Medição do torque no eixo de saída

Conforme calculado em 4.4.1 o torque mínimo para elevação da cortina deve ser de 24,11 kgf.mm e o máximo calculado é de 37,36 kgf.mm, foi realizado a medição do torque utilizando-se um dispositivo com uma alavanca de 50 mm, e com auxílio de uma balança conforme figura 30, foi dimensionada uma carga com 10% acima do torque mínimo e executado o teste para comprovar se o motorreductor cicloidal é capaz de elevar a cortina, e também realizou-se a mesma medição considerando 10% abaixo do torque máximo para verificar o comportamento do minirreductor, ver esquema de medição na figura 29, os resultados estão descritos na tabela 4.

Tabela 4-verificação do torque mínimo e máximo

MODELO	(0,530 kgf) Torque 26,52 kgf.mm	(0,672 kgf) Torque 33,62 kgf.mm	OBSERVAÇÃO
01	REPROVADO	NÃO AVALIADO	Max. 0,400 kgf
02	APROVADO	APROVADO(*)	No limite

(*) Torque de 33,62 kgf.mm identificado como máximo possível.

Fonte: compilação do autor

Observou-se que para o modelo 01, quando sem carga, o mesmo funcionou muito bem, porém ao se colocar a carga o mesmo não consegue transferir a potência do motor para a ponta do eixo de saída, o modelo 01 atingiu um torque máximo de 20 kgf.mm ficando abaixo do mínimo necessário para se conseguir girar o eixo e acionar a cortina.

No teste de torque do modelo 02 o minirredutor se mostrou eficiente com a primeira carga aplicada e percebe-se claramente a perda de velocidade, porém com a carga de 0,672 kgf, o minirredutor chega praticamente a parar no momento em que a alavanca atinge a posição de momento máximo, sendo assim esse valor seria o limite máximo de torque do mesmo.

Figura 29-teste de torque



Fonte: compilação do autor

No teste para medição do torque ficou comprovado que apenas o modelo 02 tem as condições mínimas exigidas e deve ser instalado na cortina e submetido ao teste prático com todo o conjunto montado conforme figura 30. O modelo 02 apresentou um valor de torque acima do mínimo necessário e praticamente 10% abaixo do torque máximo calculado.

6.3. Teste prático funcional e medição da rotação

O modelo 02 devidamente instalado foi submetido a um teste funcional e o resultado das medições de rotações se encontram na Tabela 5, nesta etapa utilizou-se o cronometro em vídeo para determinar o tempo total de descida e de subida da cortina, uma vez que o número de voltas necessárias para enrolar toda a cortina é de 17 voltas.

Figura 30-conjunto completo de acionamento da cortina



Fonte: compilação do autor

Tabela 5- rotação de funcionamento modelo-2 -120:1

MODELO	Tempo de Descida (s)	Rotação (RPM) Descida	Tempo de Subida (s)	Rotação (RPM) Subida
02	33	31	54	18

Fonte: compilação do autor

Analisando a Tabela 5 observa-se uma drástica redução da frequência e por consequência uma perda de potência do conjunto, durante o acionamento percebeu-se que o conjunto mini motorreductor tem uma certa dificuldade de movimentar a cortina, uma vez que a carga nesta condição esta integralmente acoplada durante todo o percurso além de alguma perda de eficiência devido ao apoio do pino de plástico que gira diretamente sobre o mancal impresso em TRITAN e também o acoplamento do eixo de saída do minirreductor ao tubo de alumínio da cortina.

Visando melhorar a eficiência do sistema foi realizada a substituição da polia movida que possui 20 dentes por uma outra polia que possui 25 dentes e o mesmo módulo da polia menor, ou seja, 25% maior, o que teoricamente dá ao sistema 25% a mais de torque e por consequência diminuía velocidade angular final sem carga também em 25%, o conjunto minirreductor passa a ter então uma relação de transmissão de 150:1, após essa modificação o conjunto é novamente testado com carga e os resultados seguem registrados na Tabela 6.

Tabela 6- rotação de funcionamento do modelo 2 -150:1

MODELO	Tempo de Descida (s)	Rotação (RPM) Descida	Tempo de Subida (s)	Rotação (RPM) Subida
02	34	30	48	21

Fonte: compilação do autor

Embora o comparativo entre os resultados apresentados na Tabela 5 e Tabela 6, não estejam substancialmente diferentes, se compararmos a relação entre rotação prevista e a rotação real com carga constante, percebe-se um ganho no rendimento do conjunto com a mudança na relação de transmissão das polias sincronizadoras.

De modo prático, como esperado, ao se ver o acionamento antes e depois da troca das polias e notável a diferença e percebe-se que no segundo momento o motor parece ser menos exigido nesta relação de 150:1, do que na relação 120:1.

Na configuração com relação de transmissão de 150:1 o conjunto se mostrou ainda mais estável e com deslocamento uniforme da cortina.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1. Conclusões

Foi realizada a construção e os testes funcionais dos modelos de minirredutor cicloidal de duplo estágio conforme proposto.

O modelo 2 foi o escolhido e montado no conjunto de acionamento da cortina, funcionou adequadamente e o protótipo foi validado.

A planilha que gera os dados da equação para parametrização das engrenagens cicloidais se mostrou extremamente útil e os dados consistentes, validados na construção.

Utilizar a ferramenta de modelagem 3D é sem dúvidas um grande diferencial para realização de projetos de desenvolvimento de produtos, pois reduz drasticamente o tempo de projeto e a análise das interferências, é prático permitindo a simulação de movimento dos componentes e favorece o entendimento e avaliação das peças no conjunto final.

Analisando o custo de aquisição de materiais apresentados para fabricação do um protótipo de minirredutor cicloidal de duplo estágio que possui um dimensionamento sob

medida, considerando que o tempo de impressão das peças é relativamente curto e que o mais interessante é a validação do projeto para produção em escala; o custo final de construção do protótipo se mostra extremamente viável;

A técnica de produção das peças em impressão 3D – FDM, se mostrou apropriada para validação do protótipo, os parâmetros utilizados no software de fatiamento foram adequados, porém é necessário ressaltar que as peças necessitam de acabamento e por vezes de ajustes mínimos o que em uma produção em série por injeção plástica por exemplo não seria necessário, ou seja, não se aplica a produção em série.

Os valores relativos à rotação no eixo de saída e torque de saída do minirredutor foram mensurados e registrados.

Desta forma pode-se afirmar que a construção de protótipos de minirredutores cicloidalis utilizando a metodologia apresentada no trabalho foi satisfatória.

7.2.Sugestões para trabalhos futuros

Modificar o sistema de transmissão primário, projetar outro sistema de acoplamento entre o motor e o minirredutor de forma a não se utilizar a correia sincronizadora, talvez um acoplamento direto flexível ou até mesmo por engrenagens de dentes retos ou helicoidais, e manter a relação de transmissão próxima de 150:1 ou pouco maior.

Utilizar diferentes modelos de motores com valores de velocidade e torque superiores ao utilizado e mensurar a potência real final do conjunto, em uma lista de possibilidades ^[26] poderia se escolher motores apropriados a cada situação e ampliar consideravelmente a aplicação do minirredutor.

Submeter o novo protótipo com as alterações sugeridas a inúmeros ciclos de trabalho e verificar a durabilidade do conjunto.

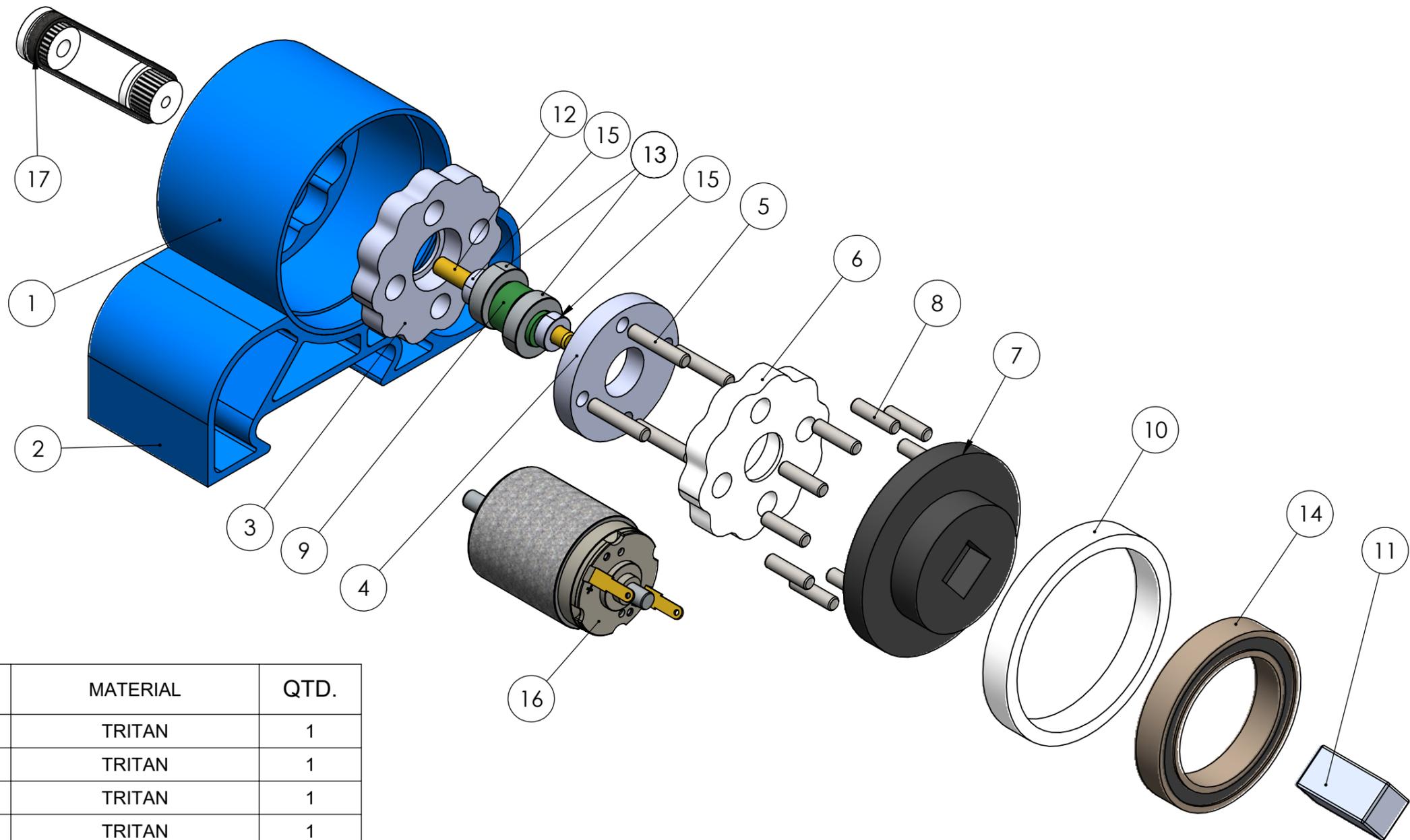
Por fim nos ensaios práticos fica evidenciado a necessidade de se trabalhar um pouco mais no aperfeiçoamento do sistema de transmissão entre o motor e o minirredutor e também na relação entre o tipo de motor utilizado e a eficiência total do sistema.

8. BIBLIOGRAFIA:

- [01] Braren, L.K., “**Gear Transmission**”. U.S Patente 1,867,492, 25 Nov (1929)
- [02] Blanche, J.G., Yang, D.C.H., “**Cycloid Drives With Machining Tolerances**”, Journal of Mechanisms, Transmission, and Automation in Design, 111(3), 337-344 (1989)
- [03] Blagojevic, M., Marjanovic, N., Djordjevic, Z., Stojanovic, B., Disic, A., “A New Design of a Two-Stage Cycloidal Speed Reducer”, Journal of Mechanical Design-ASME, 133 (2011).
- [04] SILVA, Ademar Fagundes da. **Redutor de velocidades com solução anti-backlash**. 2019. dissertação de mestrado.
- [05] BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica. 8ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 1084 p.
- [06] CABRAL Eduardo L. L. **PMR3502 – Robótica Redutores de Velocidade**. Disponível em <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4560245/mod_resource/content/0/R8_Redutores.pdf> Acesso em: 01 de julho de 2020
- [07] **Catalogo Redutores planetários**. Usinagem Santana, 2020. Disponível em: <<http://www.fresadorasantana.com.br/site/catalogos/catalogos/redutores-planetarios.pdf>> Acesso em: 03, 07 de 2020
- [08] **Construção do disco cicloidal**. TECS, 2020. Disponível em <<https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/cycloidal-drive-speed-reducer-gear/construction-of-the-cycloidal-disc/>> Acesso em: 01, 07 de 2020
- [09] DARALI. **Cycloidal Speed Reducers**, 2012. Disponível em: <<http://www.darali.com>> <http://www.darali.com/page17.html> .Acesso em: 01, 07 de 2020
- [10] **Motorredutor Cyclo® 6000** – Sumitomo Drive Technologies, 2020. Disponível em: <https://entemediadb.sumitomodrive.com/assets/mediadb/services/module/asset/downloads/viworiginal/2019/01/f0/10ed58328//Cyclo%206000%20Reducer%20Catalog.pdf> Acesso em: 02, 07 de 2020

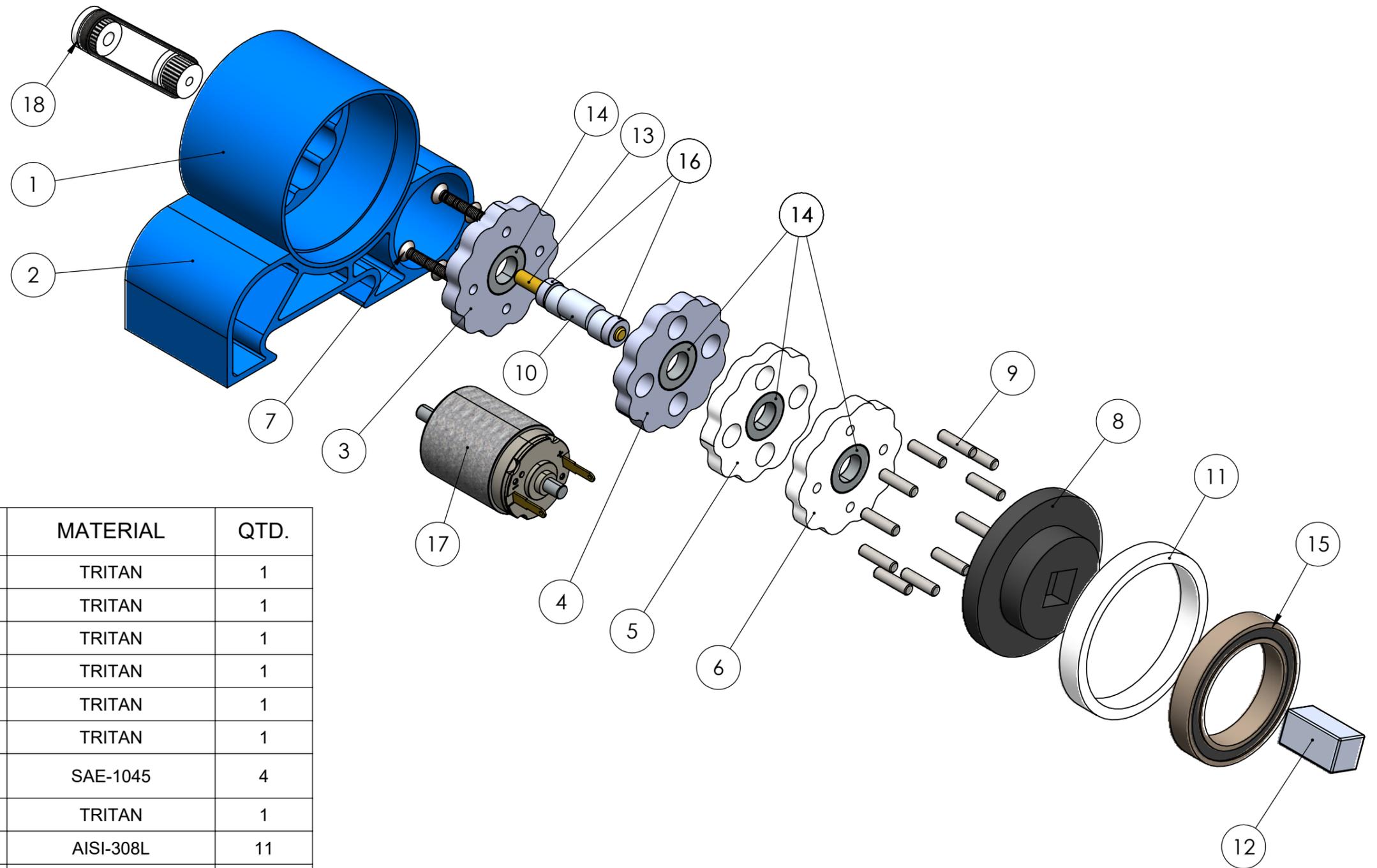
- [11] DARALI. **Cycloidal Speed Reducers**, 2012. Disponível em: <<http://www.darali.com>> <http://www.darali.com/page21.html> . Acesso em: 01, 07 de 2020
- [12] ALMEIDA, Wagner José de. **Otimização estrutural de protótipos fabricados pela tecnologia FDM utilizando o método dos elementos finitos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Projeto Mecânico) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. doi:10.11606/D.18.2007.tde-05022010-163333. Acesso em: 2020-07-01
- [13] **Tritan™ Plastic Materials Fornecidos por Eastman Chemical Company** – Prospector, 2020. Disponível em: <<https://plastics.ulprospector.com/pt/materials/3457/tritan>> . Acesso em: 01 de julho de 2020.
- [14] LOVO, João Fiore Parreira; FORTULAN, C. A. **Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo FDM**. 1º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. São Carlos, 2016.
- [15] Antonelli, Leonardo & Bombacini, Marcos. (2019). **Impressora 3D de Baixo Custo**. 10.13140/RG.2.2.33255.80802.
- [16] **Artigos Simplify3D em profundidade**. Simplify3D, 2020. Disponível em: <https://www.simplify3d.com/support/articles/> Acesso em: 03, 07 de 2020
- [17] **IMPRESSORA 3D PRO - GTMAX3D CORE A2V2. GT Max**, 2020. Disponível em: <<https://www.gtmax3d.com.br/impressora-3d-pro/gtmax3d-core-a2v2>> . Acesso em: 01, 07 de 2020
- [18] **Micro Rolamentos. cyhrolamentos**, 2020. Disponível em: <https://www.cyhrolamentos.com.br/static/arquivos/catalogo-micro-mm.pdf> . Acesso em: 01, 07 de 2020
- [19] REAL-DIEZ-MARTÍNEZ, César; CASTILLO-DÍAZ, Ramón. **Determinación del backlash de un reductor cicloidal con método gráfico**. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, v. 23, n. 1, p. 55-69, 2019.
- [20] Petrovic, Nenad & Blagojevic, Mirko & Đorđević, Zorica & Marjanovic, Vesna. (2013). **PARAMETRIC DRAWING OF A CYCLO DRIVE RELATIVE TO INPUT SHAFT ANGLE**.

- [21] MELCONIAN, Sarkis. Elementos de Máquinas. 9. Ed. Érica, 2009
- [22] **Redutor Planetário** – Pinterest, 2020. Disponível em:
<<https://br.pinterest.com/pin/328622104060344589/>> Acesso em: 03, 07 de 2020
- [23] **Redutor harmônico RDrive** – Directindustry, 2020. Disponível em:
<<https://www.directindustry.com/pt/prod/rozum-robotics/product-194921-1971969.html>>
Acesso em: 03, 07 de 2020
- [24] **Engrenagem planetária** – RAVI Industria de peças, 2020. Disponível em:
<<https://www.ravi.ind.br/engrenagem-planetaria>>
- [25] **Micromotor DC** – Neo Motion, 2020. Disponível em:
<<https://neomotion.com.br/micromotor-dc/>> Acesso em: 03, 07 de 2020.



Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	MATERIAL	QTD.
1	CARCAÇA	TRITAN	1
2	BASE	TRITAN	1
3	DISC-CICLO-11X1	TRITAN	1
4	DISCO-CENTRAL	TRITAN	1
5	PINO DISCO CENTRAL	AISI-308L	4
6	DISC-CICLO-10X1	TRITAN	1
7	DISCO SAIDA	TRITAN	1
8	PINO FIXO-SAIDA	AISI-308L	11
9	EXCENTRICO	TRITAN	1
10	BUCHA CENTRALIZADORA	TRITAN	1
11	EIXO-SAIDA	ALUMÍNIO 6063	1
12	EIXO	ALUMÍNIO ER4043	1
13	ROLAMENTO - MR148ZZ_0	SAE-52100	2
14	ROLAMENTO - 6806 -ZZ	SAE-52100	1
15	ROLAMENTO - MR84ZZ_0	SAE-52100	2
16	MOTOR-12V-6000 RPM	PADRÃO	1
17	CONJUNTO-POLIA-CORREIA	PADRÃO	1

Graduação: Engenharia Mecânica	2021
IFMG - Campus Betim	
TÍTULO: TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO MINIRREDUTOR CICLOIDAL	
DES. Nº	A3
ANEXO-01	
DISCENTE: Cleberson Vitor dos Santos	
DOCENTE: Pedro Colen	
ESCALA:1	REV.:0
FOLHA 1 DE 1	



Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	MATERIAL	QTD.
1	CARCAÇA	TRITAN	1
2	BASE	TRITAN	1
3	DISC-CICLO-11x1-E	TRITAN	1
4	DISC-CICLO-11x1-S	TRITAN	1
5	DISC-CICLO-10X1-E	TRITAN	1
6	DISC-CICLO-10X1-S	TRITAN	1
7	CAB. ESC. - M3X0.5X20	SAE-1045	4
8	DISCO SAIDA	TRITAN	1
9	PINO FIXO-SAIDA	AISI-308L	11
10	EXCENTRICO	TRITAN	1
11	BUCHA CENTRALIZADORA	TRITAN	1
12	EIXO-SAIDA	ALUMÍNIO 6360	1
13	EIXO	ALUMÍNIO ER 4043	1
14	rolamento - mr148zz_0	SAE-52100	4
15	rolamento - 6806 -ZZ	SAE-52100	1
16	rolamento - mr84zz_0	SAE-52100	2
17	MOTOR-12V-6000 RPM	PADRÃO	1
18	CONJUNTO-POLIA-CORREIA	PADRÃO	1

Graduação: Engenharia Mecânica	2021
IFMG - Campus Betim	
TÍTULO: TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO MINIRREDUTOR CICLOIDAL	
DES. Nº	A3
ANEXO-02	
DISCENTE: Cleberson Vitor dos Santos	
DOCENTE: Pedro Colen	
ESCALA:1	REV.: 0
FOLHA 1 DE 1	