

**FABRÍCIO SUNAHARA NAGAHASHI
GUSTAVO LONGHI DE CARVALHO**

**PROJETO DE UM REDUTOR PLANETÁRIO DE
DUPLO ESTÁGIO A TRAÇÃO**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo -
Departamento de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Prof. Orientador: Prof. Dr. Carlos Chien-Ching Tu
Prof. Coordenador: Prof. Dr. Edson Gomes

São Paulo

1999

Aos meus pais Kaname e Mitsue, que tanto me apoiaram e me incentivaram durante todos esses anos. (Fabrício)

Aos meus pais Roberto e Elisabete, por tudo, e também aos meus irmãos Guilherme e Renata, aos meus avós, à minha namorada Fabiana e a todos os outros membros da minha família e meus amigos que sempre me apoiaram.
(Gustavo)

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Carlos Chien-Ching-Tu pela orientação e enorme paciência.

Ao professor Dr. Eduardo Lobo Lustosa Cabral pelas explicações e sugestões para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos alunos de doutorado da EPUSP, Marcos C. Hunold e César A. F. Cisneros, pelo fornecimento de materiais de apoio e explicações.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

E a Deus, por tudo.

Índice

Lista de Símbolos Utilizados

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Resumo

Abstract

1. Introdução.....	1
1.1 Estabelecimento da Necessidade.....	1
1.2 Projetos Desenvolvidos Anteriormente.....	3
1.3 Objetivo e Roteiro do Trabalho.....	5
2. Estudo da Cinemática dos Redutores Planetários.....	7
2.1 Obtenção do Modelo do Redutor a ser Construído.....	7
2.2 Geometria e Relação de Transmissão do Redutor.....	11
3. Dimensionamento do Redutor Planetário.....	14
3.1 Dimensionamento por Tensões de Contato.....	14

4. Custos do Redutor.....	20
4.1 Custo de Peças Fabricadas por Terceiros.....	20
4.2 Custo de Material e de Usinagem das Peças Usinadas....	22
5. Processos de fabricação e Montagem.....	25
5.1 Processos de fabricação.....	25
5.2 Processos de montagem.....	26
6. Modificações realizadas durante o projeto	27
6.1 Tamanho final do redutor.....	27
6.2 Fixação dos Componentes Internos.....	27
6.2.1 Anel de fixação ou de aperto.....	28
6.2.2 Anel interno.....	28
6.2.3 Eixos.....	28
6.2.4 Vedações.....	29
6.2.5 Intercambiabilidade entre carcaças.....	29
6.2.6 Facilitação no aspecto de montagem.....	29
6.2.7 Tipo de acoplamento com o eixo do motor elétrico...	29
7. Análise dos Pontos Críticos do Redutor.....	31
8. Conclusões.....	33
9. Referências Bibliográficas.....	35

**Apêndice I – Desenho de Conjunto do Redutor e Desenhos
de Fabricação das Peças a serem Usinadas**

Lista de Símbolos Utilizados

d_s = diâmetro do sol em m ;

d_p = diâmetro do planeta em m ;

d_B = diâmetro do braço em m ;

d_A = diâmetro interno do anel interno que contém os planetas em m;

n_e = rotação do sol em rpm ;

n_p = rotação do planeta em rpm ;

n_{s1} = rotação de saída do primeiro estágio em rpm ;

v_A = velocidade do ponto A em m/s ;

F_{pt} = Força tangencial sobre o planeta;

F_s = Força tangencial sobre o sol;

T_e = Torque de entrada;

T_s = Torque de saída;

T_{e2} = Torque de entrada no segundo estágio;

T_{s2} = Torque de saída do segundo estágio;

F_{pn} = Força normal sobre o planeta;

i = Relação de transmissão;

μ = Coeficiente de atrito;

P_e = Potência de entrada;

P_s = Potência de saída;

ω_e = Rotação de entrada;

ω_s = Rotação de saída;

F_{pn2} = Força normal sobre o planeta do segundo estágio;

F_{pt2} = Força tangencial sobre o planeta do segundo estágio;

Lista de Figuras

Figura 2.2.1 Esquema lateral do redutor planetário de duplo estágio composto a tração. (Pág. 11)

Figura 2.2.2 Vista frontal representando o sol, planeta e anel externo do 1º estágio. (Pág. 11)

Figura 3.1.1 Esquema da superfície de contato elíptica. (Pág. 17)

Figura 3.1.2 Curvas de tensões de contato em função do número de ciclos até a falha por fadiga, para engrenagens retas e rolamentos de rolos e de esferas. (Pág. 18)

Lista de Tabelas

Tabela 1.2.1 Comparação de características do redutor planetário projetado e os redutores comerciais de precisão. (Pág. 4)

Tabela 2.1.1 Configurações de Redutores Planetários. (Pág. 8)

Tabela 3.1.1 Parâmetros m e n em função do ângulo θ . (Pág. 16)

Tabela 3.1.2 Vida estimada do eixo sol do redutor em função de alguns torques de saída requeridos. (Pág. 19)

Tabela 4.1 Preços das peças compradas pré-fabricadas. (Pág. 21)

Tabela 4.2 Preços dos tarugos comprados para as peças que seriam usinadas. (Pág. 22)

Resumo

Este trabalho tem o objetivo de projetar um redutor planetário de duplo estágio a tração, que possua como duas principais características a precisão de posicionamento e o baixo atrito. Este redutor não possui engrenagens e a transmissão será por atrito entre cilindros, o que possibilita que o redutor possua folga nula. Entre os cilindros de transmissão deverá haver um fluido especial, o SANTOTRAC, que deve ajudar a possibilitar um bom coeficiente de atrito entre os cilindros sem que a pressão de contato entre eles seja muito alta, o que aumenta a fadiga dos cilindros. O trabalho começa com o estabelecimento da necessidade, passa por um estudo da cinemática para que se possa obter o melhor modelo de redutor para este caso, possui um capítulo no qual é feito seu dimensionamento por tensões de contato, tem um estudo de custos, uma descrição dos seus processos de fabricação e montagem, uma análise das modificações realizadas durante o projeto e uma análise dos possíveis pontos críticos do redutor. No apêndice, ao final, encontram-se o desenho de conjunto do redutor e os desenhos de fabricação das peças que deverão ser usinadas, ressaltando-se que a maioria das peças deste redutor é pré-fabricada, o que diminui seu custo e também ajuda no fato de que suas peças usinadas não precisarão de alta precisão.

Abstract

This work has the purpose of designing a two-stage planetary head by traction, having as its main characteristics the positioning precision and the low friction. This head won't have gears and the transmission will be by friction between cylinders, what enables the head to have null backlash. Between the transmission cylinders there must be a special fluid, called SANTOTRAC, which helps to provide a good friction coefficient between the cylinders without a very high contact pressure between them, what would increase the contact fatigue of the cylinders. The work begins with the necessity establishment, has a study to obtain the best model of head for this case, has a chapter where the dimensioning is made using contact stresses, has a cost study, a description of the manufacturing processes and of the mounting process, an analysis of the modifications that were made during the project and an analysis of the possible critical points of the product. In the Appendix, in the final, there are the full drawing and the manufacturing drawings of the head. It's important to mention that most of the pieces of the head are made by factories that make its products in a great quantity, which diminishes the final cost and helps the manufactured pieces with milling not to need a great precision.

1. Introdução

1.1. Estabelecimento da Necessidade

As utilidades e aplicações de redutores são inúmeras atualmente. Eles são necessários sempre que se desejar transmitir torque e rotação de um ponto a outro. Normalmente o eixo de saída tem um torque maior e uma rotação menor que o de entrada, de forma que o redutor é um sistema mecânico capaz de transformar altas velocidades e baixos torques (normalmente as que são fornecidas por motores elétricos) em baixas velocidades e elevados torques de saída.

Os redutores podem ser encontrados em praticamente todos os tipos de máquinas operatrizes, como torno, fresadora, retificadora, entre outras, e em caixas de câmbio de automóveis. Mas os redutores de engrenagens, que sempre costumaram ser utilizados para estes fins, possuem alguns problemas que impedem que eles atinjam as necessidades de precisão que existem no atual estágio de desenvolvimento da tecnologia mecânica. Estes tipos de redutores possuem uma folga (também conhecida como jogo) que não satisfaz as exigências atuais de sistemas de transmissão de alta precisão. Devido a isto, faz-se necessário um redutor planetário a tração.

Atualmente são inúmeras as aplicações que exigem um rígido controle de precisão na movimentação de elementos mecânicos. Na tecnologia mecânica, um dos grandes desafios é desenvolver sistemas de transmissão mecânica capazes de fornecer maior precisão do controle de posicionamento dos elementos que compõem a saída do sistema.

Pode-se obter melhorias na precisão de sistemas de transmissão mecânica escolhendo e otimizando um redutor apropriado. Dentre as melhorias, pode-se citar:

- redução da flutuação de velocidade;
- redução dos níveis de vibração e ruído;

- aumento da rigidez;
- eliminação de folga;
- diminuição do peso e do tamanho do redutor.

Neste trabalho, deseja-se obter um redutor capaz de fornecer alta precisão, alta relação de redução e baixo nível de vibração com baixo custo relativo de construção. Um dos modelos que se adequa as características desejadas no trabalho é o redutor planetário a tração.

O redutor planetário de tração não possui engrenagens, pois a sua transmissão é feita por atrito entre cilindros (mas ainda separados por um filme de fluido viscoso especial, o que será explicado posteriormente), o que elimina a folga e aumenta a precisão de posicionamento. A ausência de dentes de engrenamento, neste tipo de redutor, faz com que se reduzam consideravelmente as flutuações de velocidade, bem como os níveis de vibração e ruído.

Estes tipos de redutores podem ser utilizados nos seguintes casos:

- Máquinas de produção de filme plástico;
- Aparelhos de fotografia;
- Máquina de produção de semicondutores;
- Mesa de medição;
- Aparelhos de medição de precisão;
- Instrumental médico (controle de movimento de instrumentos cirúrgicos);
- Máquinas ferramentas (controle de deslocamentos);
- Controle de movimento de robôs; etc.

Estes redutores são muito importantes pois, como dito acima, entre outras aplicações, eles podem ser utilizados em aparelhos ligados a saúde, como em algumas operações cirúrgicas, que necessitam ter uma grande precisão de posicionamento, assim como em máquinas operatrizes, já que as tolerâncias de usinagem estão cada vez mais apertadas. Além disto, eles possuem outras vantagens, como ter baixo atrito, serem em geral mais baratos e fáceis de fabricar e serem mais leves e compactos que os tipos atuais. É importante que se ressalte que as duas principais vantagens desejadas nestes redutores são a eliminação total da folga e redução do atrito.

No passado, estes redutores requeriam alta precisão, tolerâncias muito apertadas e peças construídas especialmente para ele, o que aumentava consideravelmente o seu custo. Atualmente, porém, já se pode construir estes redutores com algumas peças que possuem produção seriada, como os rolamentos de leva e apoio que podem funcionar como os planetas e anéis de fixação para ajustar o diâmetro do anel externo do redutor (detalhes serão explicados posteriormente), o que reduz consideravelmente seu custo.

1.2. Projetos Desenvolvidos Anteriormente

A empresa Mitsubishi desenvolve redutores planetários e os comercializa, porém seus redutores apresentam algumas limitações importantes, que são as seguintes: alto peso, tamanho e preço, além de baixa capacidade e redução.

No Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP estão se desenvolvendo projetos na área da robótica. Nestes projetos, há a necessidade de se obter um controle de alta precisão de um motor pneumático e braço de robô. Com o objetivo de complementar estes projetos, foi desenvolvido por César A. F. Cisneros, com supervisão dos professores Eduardo L. L. Cabral e Carlos C. C. Tu, um projeto de redutor planetário a tração composto, que possui alta relação de redução e alta relação esforço-peso, além da característica de alta precisão de posicionamento.

O sistema de redução deste projeto é composto por dois estágios, onde a relação de transmissão é de 1:100. O redutor possui 1 sol em cada estágio e 4 planetas, sendo que a entrada é o sol do 1º estágio e a saída é o anel externo do 2º estágio.

O redutor possui a seguinte capacidade :

- torque de saída : 200 N·m ;
- velocidade de entrada: 1750 rpm ;
- relação de transmissão : 1:100.

Abaixo, vem a comparação de características do redutor projetado e os comerciais de precisão:

Tabela 1.2.1 Comparação de características do redutor planetário projetado e os redutores comerciais de precisão.

Características	Redutor planetário projetado	Redutores comerciais de precisão
Diâmetro externo (mm)	180 mm	Variam entre 135 e 290 mm
Relação esforço-peso (N.m/N)	1,9	Variam entre 0,27 e 4

Este redutor tem a vantagem de ser muito compacto e a desvantagem de necessitar de peças com altíssima precisão, o que o torna muito caro. Ele foi construído e apresentou um problema relacionado com as folgas, que geram um jogo durante o seu funcionamento.

Um outro projeto também desenvolvido ligado a este assunto foi o do aluno de graduação de engenharia mecânica da EPUSP Rubens G. Araújo como bolsista de iniciação científica, também orientado pelos professores Carlos C. C. Tu e Eduardo L. L. Cabral. O trabalho desenvolvido foi um projeto básico e de detalhamento de um redutor planetário de um estágio que transmite torque pela tração entre os elementos rolantes.

Marcos C. Hunold, um aluno de doutorado da EPUSP, também orientado pelos professores C. C. C. Tu e E. L. L. Cabral, continuou o desenvolvimento deste redutor projetado pelo Rubens (com um estágio e três planetas), semelhante ao que pretende ser desenvolvido neste trabalho, com a diferença principal que o projeto do Marcos é o de um redutor de um estágio e o que pretende agora ser desenvolvido possui dois estágios.

1.3. Objetivo e Roteiro do Trabalho

O objetivo deste trabalho é de se projetar e construir um redutor planetário à tração de duplo estágio.

O redutor é denominado planetário, pois os movimentos descritos pelos elementos girantes deste mecanismo lembram o movimento dos planetas ao redor do sol. A transmissão é dita a tração, pois, ao contrário da transmissão por atrito, as superfícies rolantes ficam separadas por um filme de óleo lubrificante especial.

A redução deverá ser composta por dois estágios.

O primeiro estágio consiste num disco ("sol") que transmite a rotação e torque de entrada para os discos ("planetas") que rotacionam ao redor de seu próprio eixo e que, através do rolamento entre superfícies, descrevem uma trajetória circular ao redor do sol com o apoio de um anel externo fixo. Os eixos dos planetas estão ligados através de um suporte ("braço") que, por sua vez, é solidário ao eixo de saída.

O segundo estágio é composto por elementos semelhantes ao do primeiro estágio, sendo que o eixo de saída do primeiro estágio está solidário ao sol do segundo estágio.

A relação de transmissão estipulada para o projeto é de 1:81, sendo que cada estágio é responsável pela redução de 1:9.

Será utilizado, neste projeto, um óleo lubrificante especial cuja função, além de lubrificar as superfícies rolantes, é de separar estas superfícies e cuja característica importante é de que, quando submetido à altas pressões, este óleo desenvolve resistência ao cisalhamento e aumenta consideravelmente sua viscosidade, permitindo a transmissão de forças e momentos entre os cilindros.

O roteiro do trabalho deverá ser o seguinte:

- Estudo da cinemática dos redutores planetários;
- Dimensionamento do redutor a ser construído, utilizando-se também teoria das tensões de contato;

- Projeto do redutor com seu desenho de conjunto e todos os seus desenhos de fabricação;
- Usinagem das peças (parte dela será feita por terceiros) e montagem do redutor;
- Confecção do relatório final de todo o trabalho.

2. Estudo da Cinemática dos Redutores Planetários

Deseja-se neste capítulo estudar as possíveis configurações de redutores planetários e explicar porque será utilizada a configuração simples de dois estágios; além disto, deseja-se estudar-se a cinemática dos redutores planetários para se obterem as relações e fórmulas importantes para este redutor.

2.1 Obtenção do Modelo do Redutor a ser Construído

As possíveis configurações de redutores planetários estão na tabela 2.1 abaixo:

Tabela 2.1.1 Configurações de Redutores Planetários

GRUPO	TIPO	ESQUEMA	i (Relação de Transmissão)	η (Rendimento)
1. SIMPLES	1.1 um estágio		1.3 - 9	0.96-0.98
	1.2 dois estágios		15-60	0.93-0.97
	1.3 acoplado			
	1.4 multi rollers		→ 150	0.90
2. COMPOSTOS	2.1 saída pelo braço		1-15	0.96-0.99
	2.2 saída pelo braço		+ 1500	0.01
	2.3 saída pelo anel externo		15-1500	0.09-0.25
	2.4 saída pelo anel externo		15-1500	0.09-0.25

(Fonte: Tese de César A. F. Cisneros, pág. 13)

A configuração 1.4, a com multi roletes, não será desenvolvida pois tem uma alta complexidade em comparação com a 1.1 e a 1.2 e seu rendimento (90%), apesar de ser bom, não é tão bom quanto as duas configurações citadas e também porque podem-se atingir os objetivos propostos pelo trabalho com um redutor mais simples.

A configuração 2.1, com saída pelo braço, também não foi a escolhida pelas mesmas razões que a 1.4.

A configuração 2.2, com saída pelo sol, não foi escolhida porque, apesar de apresentar altíssimas reduções (podendo chegar a mais de 1500), é relativamente mais complexa que a 1.1 e a 1.2 e apresenta um rendimento muito baixo (por volta de 1%), o que determinou a sua não escolha.

A configuração com saída pelo anel externo foi desenvolvida por César A. F. Cisneros em sua tese (citada no item 1.2. – Projetos Desenvolvidos Anteriormente). Esta configuração possui 4 planetas e apresenta a vantagem de ser muito compacta e de apresentar uma grande redução, mas as desvantagens de ser relativamente complexa e de requerer precisões muito altas de fabricação (tolerâncias muito apertadas), o que torna sua fabricação muito cara e suscetível a pequenos erros dimensionais. Além disto, o seu rendimento não é alto.

Uma outra configuração possível foi a executada pela marca Dojen, que possibilita altíssimas reduções, podendo chegar a valores maiores que 200, porém apresenta uma baixíssima eficiência, muitas vezes inferior a 5%. Os redutores Dojen são do tipo cicloidal.

A configuração 1.1, com um estágio, não será desenvolvida pois a máxima redução é de apenas 10. Esta mesma configuração também foi a utilizada por Rubens G. Araújo em seu projeto e por Marcos C. Hunold em sua construção e consiste na redução provocada por um sistema planetário composto por um sol, 3 planetas e um anel externo fixo em um único estágio. Este é o sistema mais simples dentre todos os apresentados e apresenta a vantagem de possuir um bom rendimento (podendo ser superior a 95% como mostra a tabela) e de não exigir tolerâncias muito apertadas de fabricação. Isto torna a sua fabricação mais simples e barata que a de todos os outros modelos. Este sistema também

pretende fazer uso de algumas peças já pré-fabricadas em massa, tornando-as relativamente baratas. A desvantagem deste sistema é que ele não é tão compacto nem possibilita reduções tão altas quanto os outros.

Observando-se todas as possibilidades de configurações e pesando-se os prós e os contras de cada uma, optou-se pela configuração 1.2, que é a 1.1 com dois estágios. Escolheu-se esta configuração porque é o redutor mais simples possível de dois estágios e pode satisfazer os objetivos principais do trabalho, que são a eliminação total da folga com redução considerável do seu atrito. Também optou-se por esta configuração porque, além de ter todas as importantes vantagens da configuração 1.1, com dois estágios pode-se obter uma alta redução, o que não ocorria na configuração 1.1. Pretende-se com ela obter um redutor de precisão que não requeira precisões muito altas de fabricação e, portanto, simples de se fabricar.

O sistema escolhido possui três planetas porque chegou-se à conclusão que, neste caso, três é o número ideal de planetas por estágio. Isto é devido à experiência da configuração adotada por César A. F. Cisneros que possuía quatro planetas por estágio e apresentou sérios problemas de precisão. Um outro fato importante é que com três planetas é mais fácil de se satisfazer uma importante exigência dos redutores de atrito: todos os planetas deverão estar em contato com o sol e com o anel externo (ou separados por um finíssimo filme de fluido) constantemente; caso contrário, não haverá transmissão eficiente de torque. Com três planetas esta exigência é mais fácil de ser atingida que com 4 ou mais planetas por estágio. Este sistema será esclarecido em detalhes nos capítulos posteriores.

2.2. Geometria e relação de transmissão do redutor

Está apresentado abaixo, o esquema lateral do redutor de duplo estágio.

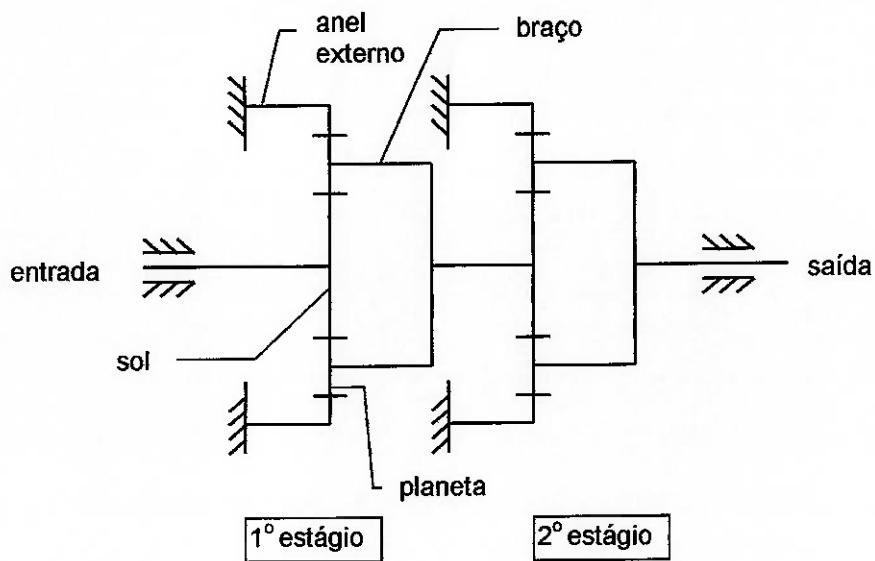


Figura 2.2.1 Esquema lateral do redutor planetário de duplo estágio composto a tração

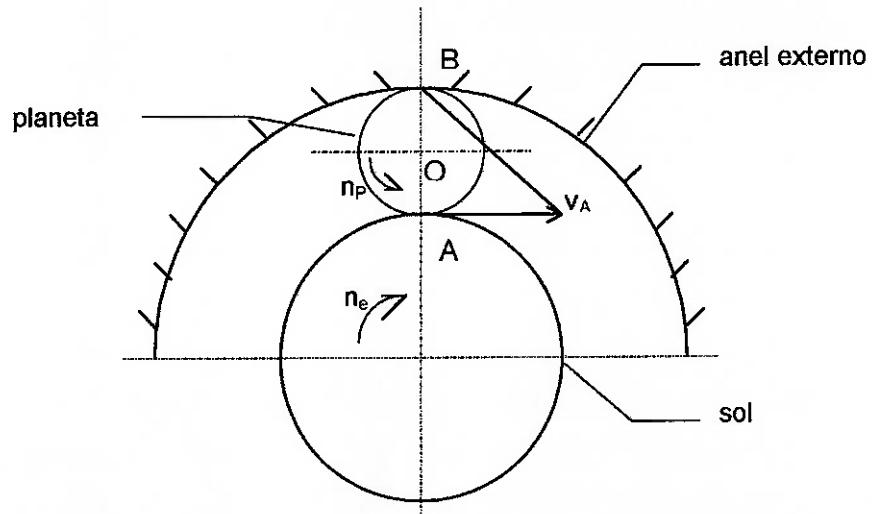


Figura 2.2.2 Vista frontal representando o sol, planeta e anel externo do 1º estágio

Para se fazer a análise cinemática do redutor denominou-se os seguintes parâmetros:

d_s = diâmetro do sol em m;

d_p = diâmetro do planeta em m;

d_B = diâmetro do braço em m;

d_A = diâmetro interno do anel interno que contém os planetas em m;

n_e = rotação do sol em rpm;

n_p = rotação do planeta em rpm;

n_{s1} = rotação de saída do primeiro estágio em rpm;

v_A = velocidade do ponto A em m/s;

$d_B = d_s + d_p$

Como o funcionamento do primeiro estágio do redutor é igual ao do segundo estágio, fez-se a análise cinemática somente para o primeiro estágio.

A velocidade do ponto A, localizado no contato entre o sol e planeta, é dada por:

$$v_A = \omega_e \cdot r_s = 2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot \left(\frac{d_s}{2} \right) = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{n_e}{60} \right) \cdot \left(\frac{d_s}{2} \right) \Rightarrow v_A = \frac{\pi \cdot n_e \cdot d_s}{60} \quad (2-1)$$

Sendo o ponto B, centro instantâneo de rotação do planeta, tem-se:

$$v_A = \omega_p \cdot 2 \cdot r_p = 2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot d_p = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{n_p}{60} \right) \cdot d_p \Rightarrow v_A = \frac{\pi \cdot n_p \cdot d_p}{30} \quad (2-2)$$

Igualando as duas expressões acima, obtém-se :

$$n_p = \frac{n_e \cdot d_s}{2 \cdot d_p} \quad (2-3)$$

Sendo o ponto B, centro instantâneo de rotação do planeta, tem-se a velocidade do ponto O que é dada por:

$$v_O = \omega_p \cdot r_p = 2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot \left(\frac{d_p}{2} \right) = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_p}{60} \cdot \left(\frac{d_p}{2} \right) \Rightarrow v_O = \frac{\pi \cdot n_p \cdot d_p}{60} \quad (2-4)$$

Substituindo a equação (2-3) em (2-4), obtém-se:

$$v_o = \frac{\pi \cdot d_p}{60} \cdot \left(\frac{n_e \cdot d_s}{2 \cdot d_p} \right) \Rightarrow v_o = \frac{\pi \cdot n_e \cdot d_s}{120} \quad (2-5)$$

Como o centro do eixo de saída, que está solidária ao braço, tem velocidade nula, tem-se:

$$v_o = \omega_{s1} \cdot r_B = 2 \cdot \pi \cdot f_{s1} \cdot \left(\frac{d_B}{2} \right) = \frac{\pi \cdot n_{s1} \cdot d_B}{60} \Rightarrow v_o = \frac{\pi \cdot n_{s1} \cdot (d_s + d_p)}{60} \quad (2-6)$$

Igualando-se as expressões, obtém-se a relação de transmissão do redutor no primeiro estágio:

$$i = \frac{n_e}{n_{s1}} = \frac{2 \cdot (d_s + d_p)}{d_s} \quad (2-7)$$

O diâmetro interno do anel que contém os planetas é:

$$d_A = d_s + 2 \cdot d_p \quad (2-8)$$

Em função de d_A , a expressão da relação de transmissão fica:

$$i = 1 + \frac{d_A}{d_s} \quad (2-9)$$

3. Dimensionamento do Redutor Planetário

3.1. Dimensionamento por Tensões de Contato

Pretende-se construir um redutor planetário de relação de transmissão igual a 9 ($i=9$). Com isto, utilizando-se a relação (2-7):

$$9 = \frac{2 \cdot (r_s + r_p)}{r_s} \Rightarrow r_p = 3,5 \cdot r_s \quad (3-1)$$

Sendo T_e o torque de entrada, tem-se que: $T_e = F_{st} \cdot r_s$ (3-2), com F_{st} sendo a força tangencial sobre o sol.

Com F_{pt} sendo a força tangencial sobre cada um dos planetas, tem-se que $F_{pt} = F_s$.

De (3-1) e (3-2) chega-se a: $T_e = 3 \cdot F_{pt} \cdot r_s$ (3-3).

Para se obter a força normal de contato e o sol e cada planeta a partir da força tangencial, tem-se: $F_{pn} = \frac{F_{pt}}{\mu}$ (3-4), com F_{pn} sendo a força normal de contato e μ o coeficiente de atrito.

Desconsiderando neste momento as perdas por atrito, a potência de entrada no redutor deve ser igual à de saída: $P_e = P_s$ (3-5).

Como $P(\text{Potência}) = T(\text{Torque}) \cdot \omega(\text{Rotação})$, tem-se, a partir de (3-5):

$$T_e \cdot \omega_e = T_s \cdot \omega_s \quad (3-6). \text{ Daí, conclui-se que } \frac{T_e}{T_s} = \frac{1}{i} \quad (3-7).$$

Substituindo-se a expressão (3-4) na (3-3), tem-se que:

$$T_e = 3 \cdot \mu \cdot F_{pn} \cdot r_s \quad (3-8)$$

Substituindo-se (3-8) em (3-7), chega-se a:

$$3 \cdot \mu \cdot F_{pn} \cdot r_s = \frac{T_s}{i} \Rightarrow F_{pn} = \frac{T_s}{3 \cdot \mu \cdot i \cdot r_s} \quad (3-9).$$

Para se dimensionar este redutor considerando-se as tensões de Hertz e fadiga de contato será feita uma análise seguindo-se o livro de S. P. Timoshenko e J. N. Goodier, "Theory of Elasticity".

O dimensionamento será feito no ponto crítico deste redutor com relação à fadiga, que é o sol do segundo estágio, devido ao fato dele possuir um diâmetro relativamente pequeno (deverá ser três vezes e meia menor que o dos planetas) e de que na entrada do segundo estágio o torque é maior (é i_1 – a relação de transmissão do primeiro estágio – vezes maior) que o torque na entrada do primeiro estágio. O pequeno diâmetro, a força normal e o alto torque transmitido tornam este o ponto crítico do redutor com relação à fadiga.

Supondo-se um torque de saída do redutor de 40 N.m ($T_{S2}=40$ N.m) e redução do segundo estágio do redutor $i_2=9$, tem-se que:

$$\frac{T_{e2}}{T_{S2}} = \frac{1}{i_2} \Rightarrow T_{e2} = \frac{40}{9} = 4,44\text{N.m}, \text{ com } T_{e2} \text{ e } T_{S2} \text{ sendo respectivamente os}$$

torques de entrada e saída do segundo estágio.

$\mu=0,06$ (coeficiente de atrito fornecido pelo filme de fluido especial SANTOTRAC, que deverá ser utilizado).

Observando-se pelo catálogo de rolamentos escolheu-se um rolo de leva (que funcionará como planeta) com diâmetro externo de 35mm, forçando-se com isto o sol a ter um diâmetro de 10mm para manter a relação de transmissão desejada. Será verificado se estes diâmetros possuem uma resistência satisfatória à fadiga de contato.

$$\text{De (3-9), tem-se que } F_{Pn2} = \frac{40}{3 \cdot 0,06 \cdot 9 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 4938,27\text{N}$$

$$F_{P12} = \mu \cdot F_{Pn2} = 296,29\text{N}$$

O rolo de leva escolhido foi o da SKF com designação 361201 R, que possui $R_p=17,5\text{mm}$, $R'_p=400\text{mm}$ (raio de abaulamento) e $B=10\text{mm}$.

O material do sol será o mesmo do rolo de leva, o aço para rolamentos 52100, que possui $\nu=0,3$ (Coeficiente de Poisson) e $E=207\text{GPa}$ (módulo de elasticidade).

$$\nu_1 = \nu_2 = 0,3 \text{ e } E_1 = E_2 = 207\text{GPa}$$

Pelo Timoshenko [2], as constantes A e B são obtidas destas equações (r é o raio do sol ou do planeta, enquanto que r' é o raio de abaulamento).

$$A + B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_s} + \frac{1}{r_s'} + \frac{1}{r_p} + \frac{1}{r_p'} \right)$$

$$B - A = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_s'} \right)^2 + \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_p'} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_s'} \right) \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_p'} \right) \cos(2\psi) \right]^{1/2}$$

$$\psi = \frac{\pi}{2}$$

No caso, chega-se a $A + B = 0,1298 \text{ mm}^{-1}$ e a $B - A = 0,0773 \text{ mm}^{-1}$

$$K_1 = K_2 = \frac{1 - v^2}{\pi \cdot E} = 1,399 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$$

$$\cos\theta = \frac{B - A}{A + B} = 0,56 \Rightarrow \theta = 55,94^\circ$$

Na tabela fornecida abaixo [2], tem-se os valores dos parâmetros m e n em função do ângulo θ .

Tabela 3.1.1 Parâmetros m e n em função do ângulo θ .

$\theta =$	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
m =	2,731	2,397	2,136	1,926	1,754	1,611	1,486	1,378	1,284	1,202	1,128	1,061	1,000
n =	0,493	0,530	0,567	0,604	0,641	0,678	0,717	0,759	0,802	0,846	0,893	0,944	1,000

Por interpolação, tem-se $m=1,59$ e $n=0,68$. Os valores a e b abaixo são os eixos da superfície (elipse) de contato formada entre o sol e o planeta.

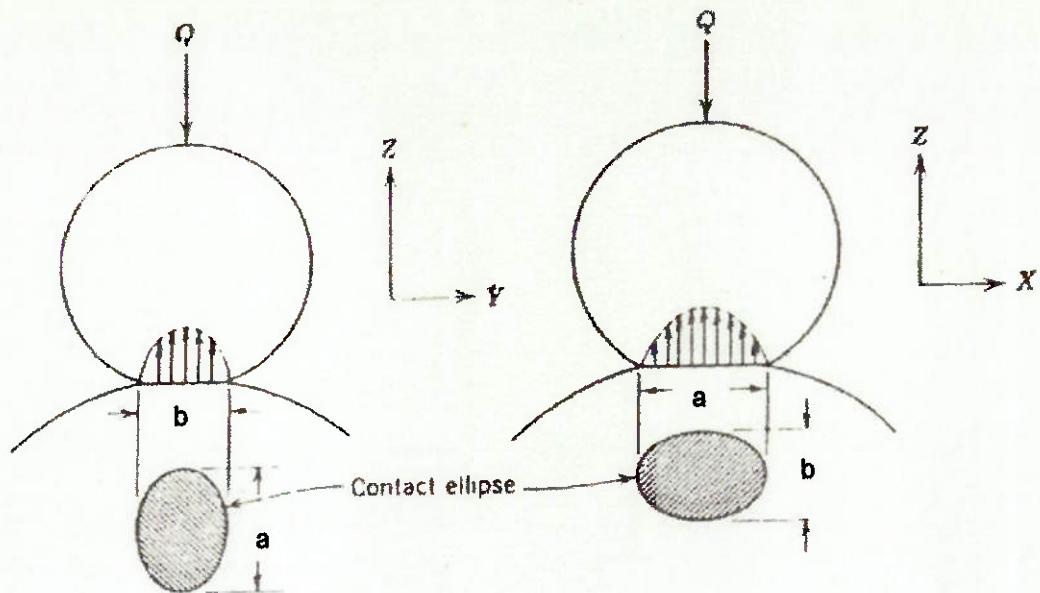


Figura 3.1.1 Esquema da superfície de contato elíptica.

$$a = m \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \cdot \frac{F_n \cdot (K_1 + K_2)}{A + B}}$$

$$b = n \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \cdot \frac{F_n \cdot (K_1 + K_2)}{A + B}}$$

No caso, $a = 9,860 \cdot 10^{-4}$ m e $b = 4,220 \cdot 10^{-4}$ m

A pressão máxima de contato é $p_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_n}{\pi \cdot a \cdot b}$

$$p_0 = 5666,66 \text{ MPa} \Rightarrow p_0 = 821,879 \text{ ksi}$$

Fazendo a analogia de fadiga de contato do sistema sol e planeta do redutor com a fadiga que ocorre nos rolos paralelos, pode-se utilizar o gráfico da figura 3.1.2 [3] para estimar o número de ciclos até a falha por fadiga do eixo-sol do redutor.

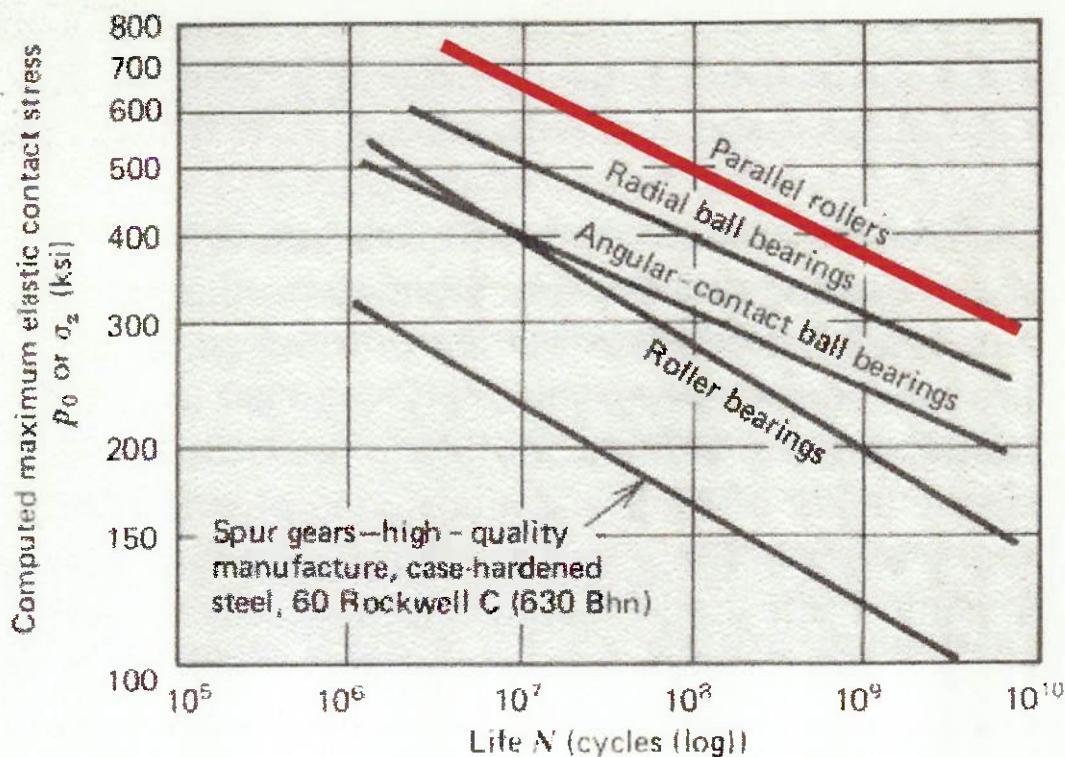


Figura 3.1.2 Curvas de tensões de contato em função do número de ciclos até a falha por fadiga, para engrenagens retas e rolamentos de rolos e de esferas. [3]

Logo, para um torque requerido de saída de 40 N.m, é necessário uma força normal entre os planetas e o sol do 2º estágio de 4938,27 N, o que ocasiona uma pressão máxima de contato de 5666,66 MPa ou 821,87 Ksi. Do gráfico da figura 3.1.2, utilizando a curva de vida de rolos paralelos para a pressão máxima de contato calculada (a curva grifada em vermelho abaixo), o eixo-sol irá apresentar uma vida aproximada de $4 \cdot 10^6$ ciclos (obtido pela aproximação pelo prolongamento da curva).

À seguir está indicada a vida aproximada do eixo-sol do redutor para diversos torques de saída requeridos.

Tabela 3.1.2 Vida estimada do eixo sol do redutor em função de alguns torques de saída requeridos.

Torque de saída requerido (N.m)	Força normal necessária (N)	Pressão máxima de contato (MPa)	Vida estimada em número de ciclos
5	617,28	2742,21	$8 \cdot 10^8$
10	1234,57	3455,34	10^8
15	1851,85	3955,21	$4 \cdot 10^7$
20	2469,13	4356,05	$2 \cdot 10^7$
25	3086,42	4698,23	10^7
30	3703,70	4982,96	$8 \cdot 10^6$
35	4320,99	5245,85	$5 \cdot 10^6$
40	4938,27	5666,66	$4 \cdot 10^6$
45	5555,56	5702,23	$3 \cdot 10^6$
50	6172,84	5906,91	$2 \cdot 10^6$

4. Custos do redutor

Este capítulo trata dos custos envolvidos neste redutor, o que envolve custo de peças componentes que já foram compradas prontas, ou seja, que já possuem fabricantes que as fabricam em série, e peças que foram usinadas especificamente para este redutor, que por sua vez possuem custo de material e de usinagem.

4.1. Custo de Peças Fabricadas por Terceiros

É importante que se ressalte que para que se obtivesse o mínimo custo possível para o produto e para que ele fosse construído da maneira mais simples possível optou-se pelo maior número possível de peças compradas prontas para compor o redutor. Isto ocorreu porque este tipo de peça possui algumas importantes vantagens em relação às peças usinadas, que são:

- Menor custo, devido ao fato de que são fabricadas em série por fabricantes especializados;
- Qualidade garantida por fabricantes confiáveis, o que seria muito mais difícil de se conseguir se a fabricação fosse através de usinagem própria;
- Tempo de obtenção dos produtos consideravelmente menor.

Ou seja, as peças compradas possuem a vantagem de tornar o redutor mais simples, mais preciso, mais barato e mais fácil de ser fabricado e por isto procurou-se minimizar o número de peças usinadas especialmente para este redutor.

Abaixo, na tabela 4.1, encontram-se todas as peças fabricadas por terceiros que compõem o redutor. Os preços obtidos estão em dólar devido à instabilidade da moeda nacional, no caso o Real. Com a cotação em dólar é possível que se possa estimar o valor destes produtos por mais tempo. A cotação adotada é próxima da atual (1 Dólar=2 Reais). Os preços que possuem uma ~ atrás de sua indicação são aproximados, devido ao fato de que os valores

unitários destas peças são muito pequenos (ex: arruela, que tem preço da ordem de poucos centavos).

Tabela 4.1 Preços das peças compradas pré-fabricadas

Listagem de Preços					
Número	Item	Qtde	U\$\$/un.	Total(U\$\$)	Fornec.
2	parafuso sextavado interno Allen M5X15 (DIN 912)	4	~0,05	~0,2	
4	retentor radial d30XD40Xb7 (DIN 3760)	1	2,00	2,00	
5	mola Smalley	1	Amostra		Smalley
6	parafuso cab. sextavada M5X15	1	~0,05	~0,05	
8	anel de fixação	2	93,00	186,00	Schafer
9	anel interno INA d80XD90Xb30 (IR)DIN 620	2	22,00	44,00	INA
11	esfera d4 SKF RB-4	2	0,50	0,50	
13	rolamento contato angular 7206 BECB	2	25,00	50,00	NSK
14,22	parafuso cab. sextavada M5X20	9	0,05	0,45	
15	arruela d26XD40X4 (DIN 433)	1	0,10	0,10	
16	arruela de trava MB5	1	0,65	0,65	
17	porca de fixação M25X1,5 KM5	1	1,75	1,75	
19	retentor radial d20XD30Xb7 (DIN 3760)	1	1,50	1,50	
21	anel elástico interno d62 (DIN 472)	1	~0,30	~0,30	
24	arruela d13XD20X2(DIN 435)	6	0,10	0,60	
25	rolos de leva SKF 305801 C-2Z	6	~25,00	~150,00	NSK
26	O-Ring d1/8" X D 5+3/8"	2	0,30	0,60	
27	anel elástico interno D30(d28,6) (DIN 471)	2	~0,20	~0,20	
28	rolamento de esferas 6206	1	~4,00	~4,00	
29	porca sextavada M8 (DIN 934)	8	~0,05	~0,40	
30	arruela d8XD17X2 (DIN 125)	8	~0,03	~0,24	
31	parafuso cab. sextavada M8X30 (DIN 558)	10	0,10	1,00	
TOTAL(R\$)				~445,00	

Desta forma, conclui-se que o custo total das peças compradas prontas para este redutor foi de aproximadamente 445 Dólares (890 Reais), sendo que os itens mais caros foram os dois anéis de aperto, que totalizaram 186 dólares, e os 6 rolos de leva (que funcionarão como os planetas do redutor), que totalizaram 150 dólares. Por último, deve-se considerar neste redutor o preço do lubrificante, o fluido especial SANTOTRAC, que é um fluido extremamente caro e que apresenta a importante característica de aumentar sensivelmente sua viscosidade quando é pressionado, o que ocorre quando ele fica entre o sol e os planetas. Com este aumento de viscosidade, este fluido tem a importante característica de possibilitar um atrito razoável entre o sol e o planeta (o que é

fundamental, já que a transmissão é por atrito) sem uma pressão de contato excessiva entre eles. Como já mencionado, este fluido é caro (custa da ordem de 500 dólares por litro) e por isto deve agregar ao redutor um custo adicional de material que foi estimado em 100 dólares. Com isto, o preço das peças pré-fabricadas (incluindo o fluido lubrificante) do redutor foi estimado em 545 dólares.

4.2. Custo de Material e de Usinagem das Peças Usinadas

Um outro custo envolvido no projeto foi o relativo às peças usinadas. Estas peças são nove, e seus desenhos de fabricação estão anexos no final do trabalho. As peças são:

- 3 Carcaças (A de entrada, a de saída e a intermediária, que é uma só porque o redutor possui dois estágios), sendo uma de cada;
- Eixo do planeta (Quantidade: 6);
- Eixos de entrada e de saída (Quantidade: 1 de cada);
- Eixo intermediário (ou eixo sol do segundo estágio – Quantidade: 1);
- Tampa do redutor (Quantidade: 1);
- Suporte do Acoplamento (Quantidade: 1);

Para a fabricação destas peças foi necessária a compra de cinco tarugos de aço, cujas características e preços obtidos estão abaixo na tabela 4.2:

Tabela 4.2 Preços dos tarugos comprados para as peças que seriam usinadas.

Listagem de Preços					
Número	Item	Qtde	U\$\$/unidade	Total(U\$\$)	Fornecedor
1,7,12	Tarugo d160X265 ABNT 1020	1	41,80	41,80	
3	Tarugo d35X160 ABNT 8620	1	2,35	2,35	
10	Tarugo d20X300 ABNT 1020	1	0,90	0,90	
18,23	Tarugo d75X210 ABNT 8620	1	12,20	12,20	
20	Tarugo d110X30 ABNT 1020	1	2,50	2,50	
TOTAL(R\$)				59,75	

Desta tabela, conclui-se que o preço total obtido para os tarugos foi de aproximadamente 60 dólares, o que totaliza o custo dos materiais do redutor em aproximadamente 605 dólares (sem contar preço de usinagem das peças).

Com relação ao custo de usinagem das peças, elas deverão ser usinadas na própria escola, o que praticamente torna seus custos nulos neste caso. Porém, para se fornecer uma perspectiva mais real do custo que este protótipo teria no mercado foi feita uma cotação em um centro de usinagem convencional. Os preços obtidos foram aproximadamente os seguintes:

- Custo de usinagem das carcaças 1 e 3: 350 dólares cada (Total: 700 dólares). A maior parte deste preço é devida à retificação das superfícies internas da peça);
- Custo de usinagem da carcaça 2 (intermediária): 250 dólares (O preço é menor devido a esta carcaça ser consideravelmente menor que as carcaças 1 e 3);
- Custo de usinagem (incluindo a eletroerosão) e tratamento térmico dos eixos intermediário e de saída: 125 dólares cada (a maior parte do custo decorre da eletroerosão e o tratamento térmico de cementação é necessário nos eixos pois eles entrarão em contato com os planetas, que são rolos de leva e por isto são de aço para rolamento, duros, e os eixos precisam ficar mais duros para que fiquem mais resistente à fadiga de contato);
- Custo estimado de usinagem do eixo de entrada: 80 dólares (este eixo não possui eletroerosão em seu processo de fabricação);
- Custo estimado de usinagem do eixo do planeta: 10 dólares cada (total: 60 dólares, pois o redutor possui 6 eixos do planeta);
- Custo estimado de usinagem da tampa: 35 dólares;
- Custo estimado para a usinagem do suporte de acoplamento: 25 dólares;

Com isto, obtém-se o custo total de usinagem para este protótipo: 1400 dólares.

Daí, conclui-se que o custo total estimado para o protótipo foi de 545 dólares (peças compradas prontas) + 60 dólares (custo do material para usinagem) + 1400 dólares (custo de usinagem) = 2005 dólares. Se a usinagem for feita na própria Escola Politécnica (Departamento de Engenharia Mecânica) o custo será de 605 dólares.

Este alto preço obtido para o redutor (considerando-se o preço de usinagem) foi devido principalmente ao custo de usinagem, que está excessivamente alto e com certeza pode-se obter um custo de usinagem menor em outros lugares. Um outro ponto importante é o fato de que este é o custo do protótipo do redutor. Se este redutor vier a ser produzido comercialmente com certeza todos os seus custos serão sensivelmente diminuídos.

5. Processos de fabricação e montagem

5.1. Processos de fabricação

A maior parte das peças que compõem o redutor estão disponíveis no mercado a preços relativamente acessíveis, o que ocasiona a redução nos custos de fabricação e, consequentemente, nos custos finais do redutor.

As peças que serão fabricadas são as seguintes:

- 3 carcaças;
- 3 eixos (1 com acoplamento);
- 1 tampa;
- 6 eixos dos planetas.

Todas as peças serão obtidas através da usinagem de tarugos. Algumas partes de funcionalidade de precisão exigirão o processo de retificação.

Nas 3 carcaças, os processos de fabricação utilizados serão o torneamento, fresamento, retificação, furação e rosqueamento.

O torneamento será realizado na superfície cilíndrica externa da carcaça, bem como, na superfície interna do mesmo.

A fresamento será realizada nas superfícies externas planas da carcaça.

A retificação será realizada na parte interna do redutor onde são fixos os rolamentos e também os anéis de fixação (ou de aperto).

Para se fazer a junção das carcaças, deverão se fazer furos nas flanges das mesmas para fixação através de parafusos e porcas. Serão feitos dois furos rosados para retirada e colocação de óleo lubrificante. Na junção entre a tampa e a carcaça de saída do redutor serão feitos oito furos rosados para fixação dos parafusos.

No eixo de entrada do redutor serão necessários os processos de torneamento, retificação, furação, rosqueamento e corte.

A retificação será realizada no local onde o rolamento rígido de esferas é fixo, no local onde o sol entrará em contato com os planetas e no furo onde ocorre o acoplamento. Na região de contato do sol (extremidade do eixo) será realizado o processo de tratamento superficial de cementação para melhorar a sua resistência à fadiga.

No acoplamento do eixo de entrada do redutor será realizado a furação e rosqueamento para fixação dos parafusos.

Nos 2 eixos (de saída e intermediário) será realizado o processo de electroerosão para se fazer as cavidades ao redor dos eixos dos planetas.

5.2. Processos de montagem

A montagem do redutor será realizada no sentido da esquerda para a direita (início no eixo e carcaça de saída e fim na carcaça de entrada).

Primeiro, fixam-se os eixos com os rolos de leva do 2º estágio no interior dos furos do braço do eixo de saída. Este ajuste é interferente. Após isto, fixa-se o rolamento de contato angular da esquerda no eixo de saída. Fixa-se o anel elástico interno na carcaça e apoia-se, sobre este, o rolamento de contato angular da esquerda já fixo ao eixo. Coloca-se outro rolamento de contato angular sobre o eixo no interior da carcaça. Com o auxílio da porca de fixação, aperta-se o rolamento contra o anel elástico para evitar folgas axiais. Fixa-se a tampa de saída com o retentor radial já montado. Coloca-se o anel de aperto junto com o anel interno sobre os rolos de leva. Posiciona-se a esfera entre o eixo de saída e o intermediário. Monta-se o eixo intermediário com os rolos de leva fixos. Coloca-se o sol do eixo intermediário posicionado entre os planetas e apoiado sobre a esfera. Apertam-se os parafusos do anel de fixação de modo a possibilitar a transmissão de torque do eixo intermediário para o eixo de saída. Encaixa-se a carcaça intermediária na carcaça de saída e repete-se o processo de fixação do eixo intermediário com os rolos de leva do 2º estágio, agora com os rolos de leva do 1º estágio.

Coloca-se a mola no interior da carcaça de entrada e apoiada sobre o anel externo do rolamento rígido de esferas. Apertam-se os parafusos do anel de aperto e fecha-se o redutor encaixando-se a carcaça de entrada na carcaça intermediária. Por último, coloca-se o retentor radial na entrada do redutor e fixam-se, com parafusos e porcas, as flanges de junção entre as carcaças.

6. Modificações realizadas durante o projeto do redutor

Durante o projeto do redutor foram realizados modificações no projeto com o objetivo de eliminar possíveis problemas, bem como, melhorar o desempenho, facilitar a fabricação e reduzir custos.

Foram abordados os seguintes aspectos durante o projeto:

- Tamanho final do redutor;
- Fixação dos componentes internos;
- Vedações;
- Intercambialidade entre carcaças;
- Facilitação no aspecto de montagem;
- Tipo de acoplamento com o eixo do motor elétrico.

6.1. Tamanho final do redutor

Foi determinado que o redutor teria que possuir um tamanho final menor ou pelo menos semelhante aos disponíveis comercialmente. Logo, escolheu-se os tamanhos dos eixos-sol e planeta de modo a apresentar uma geometria que possibilitasse construir um redutor com boa relação de tamanho e capacidade de redução. Definido o tamanho das peças principais do redutor, fez-se o estudo da melhor acomodação das peças no interior do redutor de modo a reduzir os espaços vazios entre peças, permitindo a construção de um redutor mais compacto possível. Escolheu-se como configuração externa do redutor (carcaças) as mesmas utilizadas para certos redutores comercialmente comuns, onde a fixação é realizada por 4 parafusos localizados nas extremidades (flanges) da carcaça.

6.2. Fixação dos componentes internos

Foram discutidas várias alternativas para melhorar a fixação dos componentes internos do redutor. Os componentes analisados foram:

- anel de fixação ou de aperto;

- anel interno (onde os planetas se apoiam e se deslocam);
- eixos.

6.2.1. Anel de fixação ou de aperto

A primeira preocupação foi de se eliminar o possível deslocamento do anel de fixação (aperto) com relação à carcaça. A primeira solução previa a colocação de 2 anéis elásticos internos (um de cada lado do anel de fixação) fixo na carcaça para evitar o deslocamento deste nos dois sentidos. Porém, por dificuldades de apoio lateral no anel de fixação, optou-se por outra alternativa, que apresentava maiores facilidades de execução.

A alternativa escolhida previa o aproveitamento da carcaça para fornecer um dos apoios laterais do anel de fixação e outro apoio lateral seria fornecido pelo próprio encaixe entre as carcaças. Com essa alternativa, eliminou-se o deslocamento do anel de fixação sobre a carcaça sem a adição de peças auxiliares.

6.2.2. Anel interno

Para se eliminar o deslocamento do anel interno no interior do redutor, decidiu-se fazer o apoio dos dois lados com o prolongamento do interior da carcaça.

6.2.3. Eixos

Para se evitar o deslocamento axial dos eixos, optou-se por colocar uma mola apoiada na carcaça e no anel externo do rolamento do eixo-sol do 1º estágio, de modo a exercer uma força axial sobre o eixo-sol do 2º estágio, que por sua vez, é apoiada no eixo de saída. Entre os eixos optou-se por colocar uma esfera que permitisse a rotação relativa dos eixos. Outra opção analisada foi a de colocar mini-rolamentos nas regiões de contato entre eixos ao invés das esferas, porém, os custos envolvidos e as dificuldades de fabricação fizeram com que esta alternativa não fosse escolhida.

6.2.4. Vedações

Para as vedações entre as carcaças decidiu-se utilizar anéis do tipo O-Ring aproveitando-se do ressalto interno de encaixe.

Para as vedações entre os eixos de entrada e saída e as carcaças optou-se por colocar retentores radiais. No contato entre a carcaça e o eixo de entrada do redutor, colocou-se um retentor radial encaixado pelo lado externo do redutor para facilitar a montagem do mesmo.

6.2.5. Intercambiabilidade entre carcaças

Para que houvesse a possibilidade da adição ou remoção de estágios do redutor, optou-se por dividir a carcaça em módulos. Os módulos possuem encaixes comuns o que possibilita a retirada ou adição de estágios entre os módulos de entrada e saída do redutor. Isso possibilitaria maior versatilidade quanto ao ajuste da relação de transmissão do redutor.

6.2.6. Facilitação no aspecto de montagem

Para se facilitar a montagem do redutor optou-se por se utilizar a configuração elaborada no trabalho do redutor do aluno de graduação Rubens G. Araújo, onde se fez um rasgo ao redor do local (braço) onde os eixos dos planetas são fixos, de modo, que também se reduzisse as exigências com relação a tolerâncias de fabricação muito pequenas (alta precisão de fabricação das peças).

Analisa-se também como o fluido lubrificante seria retirado ou colocado no interior do redutor no momento da montagem ou desmontagem. Decidiu-se fazer dois furos rosados (para colocação posterior dos parafusos de vedação). Um furo se localiza na parte superior da carcaça de saída do redutor, com o objetivo da colocação do fluido. Outro furo se localiza na parte inferior do redutor de modo a permitir a retirada do fluido no momento da desmontagem.

6.2.7. Tipo de acoplamento com o eixo do motor elétrico

Analisa-se vários modelos de acoplamentos existentes no mercado, e optou-se pelo aproveitamento do próprio eixo de entrada para se fazer o

acoplamento. O eixo é cortado em duas partes, onde uma faz parte do próprio corpo principal do eixo e outra faz a função de tampa de fixação.

7. Análise dos pontos críticos do redutor

Embora não se tenha conseguido construir o redutor por falta de tempo, o que forneceria dados mais concretos sobre os pontos críticos e sobre o que deveria ser melhorado neste redutor, já se podem apontar os possíveis pontos críticos do produto. Estes pontos e outros que forem detectados após sua construção e teste deverão ser analisados para que a próxima versão deste redutor fique melhor que esta, embora seja importante que se ressalte que para este projeto já se procurou minimizar ao máximo o número de pontos críticos e procurou-se fazer uma versão de redutor melhor que a anterior.

O primeiro possível ponto crítico do redutor é a mola (peça número 5 do desenho de conjunto), que é responsável por apertar o rolamento que está preso ao eixo de entrada na direção axial, para que desta forma se evite o deslocamento axial das peças do redutor (a mola entra em contato com o eixo de entrada que impede o movimento do eixo intermediário, que por sua vez impede o movimento axial do eixo de saída, que do outro lado está impedido de se mover pela tampa do redutor).

A mola é um ponto crítico porque ela vai causar um aumento de atrito ao redutor, e não se sabe se este aumento irá prejudicar substancialmente o desempenho do redutor ou não. Afinal um dos principais objetivos a serem obtidos com este redutor é um baixo atrito. Um outro fato relevante sobre esta mola está ligado ao fato de haver dúvida sobre ela ser realmente necessária ou não (Como este redutor praticamente só apresenta esforços na direção radial, é possível que não haja movimento de peças na direção axial mesmo sem a presença da mola). De qualquer forma, a mola está presente para evitar um possível jogo do redutor na direção axial.

Um outro ponto crítico a ser discutido é relativo às esferas (Peças número 11 no desenho de conjunto). Elas também possuem a função de ajudar a impedir o movimento axial das peças do redutor com um mínimo de atrito possível. O ponto de discussão é o mesmo do caso da mola: Este atrito adicionado pelas esferas é considerável ou não? A seu favor está o fato de que a região de contato da esfera com os eixos deverá ser muito pequena (teoricamente deveria

ser apenas um ponto) e por isto o atrito adicionado não seria muito grande. Um fato negativo relativo às esferas é o de que cada uma das esferas estará em contato com dois eixos, sendo que eles estarão com diferentes rotações. Isto provocará necessariamente um deslizamento da esfera em relação a um dos eixos, o que gerará um atrito de deslizamento da esfera em relação a um dos eixos e este atrito de deslizamento certamente será maior que o de rolamento da esfera. Durante a realização do projeto sugeriu-se (sugestão do Prof. E.L.L.Cabral) a introdução de um mini-rolamento axial no lugar destas esferas, o que de fato tornaria o atrito na região muito baixo (o atrito só seria de rolamento, não haveria atrito de deslizamento a princípio). Porém, esta idéia a princípio não foi adotada devido às dificuldades de fabricação adicionais que ocorreriam com a introdução deste mini-rolamento (o espaço disponível para sua alocação seria muito pequeno nos braços e a usinagem desta região iria requerer uma alta precisão. De qualquer forma, estas esferas são um ponto crítico e devem ser analisadas em testes futuros para se analisar se há a necessidade dos rolamentos axiais em seu lugar ou não.

Um outro ponto crítico deste redutor é a sua montagem. Ela não é simples pois há alguns ajustes interferentes no produto, como os dos rolamentos com os eixos e dos eixos dos planetas com os braços. A montagem também deve ser feita em um local limpo, pois a sujeira pode comprometer o rendimento do redutor.

8. Conclusões

Na conclusão deste trabalho serão abordadas primeiramente as vantagens e posteriormente as desvantagens deste redutor projetado. Suas principais vantagens são:

- Possui um baixo custo (cerca de 600 dólares, sem contar a sua fabricação) em comparação com os redutores similares do mercado, também considerando-se que se trata de uma máquina de precisão.
- Apresenta projeto e fabricação relativamente simples, sendo que sobre a fabricação é importante ressaltar que não há exigências de tolerâncias muito apertadas em peça alguma, o melhor acabamento requerido pode ser fornecido por uma retífica comum. Esta grande virtude deste redutor, que é a de não exigir precisões muito grandes de fabricação, é devida principalmente ao sistema que existe nos braços dos eixos intermediário e de saída do redutor, onde os eixos do planeta são acomodados. Este sistema possui rigidez tangencial e funciona como uma mola na direção radial, possibilitando com isto pequenas deformações nesta direção e por isto pequenas acomodações no posicionamento dos planetas em relação ao anel externo, que com isto não precisa ter um acabamento tão preciso na sua superfície interna. Este sistema pode ser visualizado no Corte C-C do desenho de conjunto ou nos desenhos de fabricação do eixo intermediário e do de saída.
- Trata-se de um redutor que é compacto (durante o projeto procurou-se gerar um redutor que fornecesse os resultados desejados com o menor tamanho possível) e possui um bom desempenho para o seu tamanho.
- Este produto possui poucos pontos críticos. Isto é muito devido ao fato de que este redutor foi projetado considerando-se as experiências e os erros observados nos trabalhos anteriores referentes ao mesmo assunto.
- Ele agrupa muitas peças pré-fabricadas, que são mais precisas e mais baratas, devido ao fato de que são fabricadas por fornecedores específicos e especialistas que as fabricam em massa. Onde foi necessária uma precisão maior no redutor esta foi satisfeita através de uma peça pré-fabricada.

As principais desvantagens do redutor são:

- Ele fornece um baixo torque se comparado com outros redutores similares.
- Sua fabricação, baseando-se nas estimativas feitas, será possivelmente cara mesmo não havendo um número muito grande de peças para serem fabricadas.
- Sua montagem é complexa e deve ser feita em local limpo. Ela envolve alguns ajustes interferentes e deve ser feita de forma precisa.

Como sugestões para a continuação deste trabalho, sugere-se a construção e teste deste redutor (não foi possível construí-lo a tempo para este trabalho), para que se analise esta configuração de redutor, seus pontos críticos e para se verificar se estes pontos críticos influem substancialmente no desempenho do redutor ou não.

Sugere-se também que se faça um estudo mais detalhado sobre a medição e estimativa da força do anel de aperto, ou seja, da força que se deve aplicar neste anel. Acredita-se que um modo possível de se estimar esta força de aperto seja através do uso de strain-gages (extensômetros).

Também é importante que com o redutor construído seja feita uma verificação de sua vida útil para se verificar se é próxima da estimada, e também seja feito um estudo e estimativa sobre a eficiência do sistema, já que ele é composto de muitas partes móveis e isto pode comprometer sua eficiência, e finalmente o objetivo principal e final do teste deverá ser verificar se as duas principais vantagens que deve possuir este redutor - alta precisão de posicionamento e baixo atrito – são realmente atingidas. O desenho de conjunto e os de fabricação das peças do redutor encontram-se no Apêndice I.

9. Referências Bibliográficas

- [1] CISNEROS, C. A. F. **Projeto de um Redutor Planetário Composto a Tração.** Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1996.
- [2] TIMOSHENKO, S.P. & GOODIER, J.N. **Theory of Elasticity.** 3^a ed., McGraw-Hill, 1970.
- [3] JUVINALL, R.C, & MARSHEK, K.M. **Fundamentals of Machine Component Design.** 2^a ed., John Wiley & Sons, EUA, 1991.
- [4] KUAE, L.K.N., BONESIO, M.C.M., REIS, M.G.C. **Diretrizes para Apresentação de Dissertações e Teses.** Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1991.

**Apêndice I – Desenho de Conjunto do Redutor e Desenhos
de Fabricação das Peças a serem Usinadas**