

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E

AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS



Estudo e Desenvolvimento de um Acoplamento Magnético

Thomas Rezek Matsumoto

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS



Projeto de Formatura – 2010

Estudo e Desenvolvimento de um Acoplamento Magnético

ALUNO: Thomas Rezek Matsumoto
ORIENTADOR: Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu
COORDENADOR: Prof. Dr. Carlos Márcio Vieira Tahan

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu, que sempre me orientou de forma muito diligente, pelos valiosos conselhos dados ao longo da realização deste trabalho e por sua disposição em me ensinar e corrigir.

Ademais, agradeço ao coordenador do projeto, Prof. Dr. Carlos Márcio Vieira Tahan, pelas orientações relativas ao andamento do trabalho, que me foram essenciais para cumprir os prazos, sem perder qualidade.

Gostaria de também prestar os agradecimentos aos meus familiares, amigos e colegas de trabalho que sempre me incentivaram e colaboraram de forma positiva.

Sumário

1. Resumo.....	7
2. Introdução.....	8
3. Objetivo.....	8
4. Atualização bibliográfica.....	9
5.1 Topologias.....	9
5.2 Aplicações.....	13
5. Materiais e métodos.....	18
5.1. Cálculo para a configuração radial.....	19
5.2. Cálculo para a configuração axial.....	20
6. Resultados.....	22
6.1. Configuração Radial.....	22
6.2. Configuração Axial.....	25
7. Projeto.....	26
7.1. Pré-projeto.....	27
7.2. Modelamento em AutoCAD.....	31
7.3. Execução do protótipo.....	34
8. Testes.....	39
9. Conclusão.....	43
10. Propostas para continuação dos estudos.....	45
11. Referências bibliográficas.....	46
12. Anexos.....	48
12.1. Anexo A – Fórmulas para a configuração radial.....	48
12.2. Anexo B – Programação em VBA.....	51
12.3. Anexo C – Fórmulas para a configuração axial.....	53
12.4. Anexo D – Programação em Matlab.....	55
12.5. Anexo E – Dimensionamento do rotor.....	57
12.6. Anexo F – Desenhos de execução.....	58

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema tridimensional da configuração radial.....	10
Figura 2 - Esquema bidimensional da configuração radial.	10
Figura 3 - Esquema tridimensional da configuração axial.....	11
Figura 4 - Esquema bidimensional da configuração axial	11
Figura 5 - Configuração com três coroas de ímãs	12
Figura 6 - Configuração com ímãs de diferentes comprimentos	13
Figura 7 - Exemplo de aplicação do acoplamento magnético: compressor	14
Figura 8 - Exemplo de aplicação do acoplamento magnético: bombas para irrigação	14
Figura 9 - Exemplo de aplicação de acoplamento magnético: bomba hidráulica	14
Figura 10 - Exemplo de aplicação do acoplamento magnético: ventiladores	15
Figura 11 - Exemplo de aplicação do acoplamento magnético: esteira transportadora.....	15
Figura 12 - Exemplo de aplicação do acoplamento magnético: misturadores.....	16
Figura 13 - Exemplo de aplicação do acoplamento magnético: bomba artificial para o coração humano	16
Figura 14 - Desalinhamento axial.....	17
Figura 15 - Desalinhamento angular	17
Figura 16 - Parametrização na configuração radial.....	19
Figura 17 - Parâmetros para o cálculo radial no rotor	20
Figura 18 - Parametrização na configuração axial	21
Figura 19 - Gráfico da força tangencial em função do ângulo de rotação θ	22
Figura 20 - Gráfico do torque em função do ângulo de rotação.....	23
Figura 21 - Torque em função do número de pares de pólos.....	23
Figura 22 - Torque em função do entreferro	24
Figura 23 - Torque em função do comprimento	24
Figura 24 - Torque em função da largura.....	25
Figura 25 - Força tangencial em função do ângulo de rotação.....	26
Figura 26 - Efeito do material ferromagnético no acoplamento	28
Figura 27 - Gráfico da força tangencial entre um par de ímãs em função do ângulo de rotação para um entreferro de 1mm	29
Figura 28 - Gráfico do torque em função do ângulo de rotação para o acoplamento magnético com 16 pólos e 1 mm de entreferro	30

Figura 29 - Modelamento do suporte dos ímãs no rotor.....	32
Figura 30 - Modelamento do rotor	32
Figura 31 - Modelamento do suporte do rotor.....	32
Figura 32 - Modelamento da montagem de um dos lados do acoplamento magnético.....	33
Figura 33 - Modelamento da montagem final do acoplamento magnético	34
Figura 34 – Peças fabricadas do acoplamento magnético	35
Figura 35 - Ímãs de neodímio empregados no acoplamento magnético	35
Figura 36 - Rolamentos utilizados no acoplamento magnético.....	36
Figura 37 - Montagem de um dos rotores do acoplamento magnético	37
Figura 38 - Detalhe de montagem do anel de retenção	37
Figura 39 - Rotores montados em seus respectivos suportes	38
Figura 40 - Montagem final do protótipo do acoplamento magnético	38
Figura 41 - Arranjo para a medição do deslocamento angular.....	39
Figura 42 - Detalhe da fixação do braço no eixo do acoplamento.....	40
Figura 43 - Arranjo completo do acoplamento para as medições.....	41
Figura 44 – Comparação entre o torque medido e calculado em função do deslocamento angular para vários entreferros	42
Figura 45 - Parâmetros na configuração radial	48
Figura 46 - Parâmetros para o cálculo radial	50
Figura 47 - Dimensionamento do rotor.....	57

1. Resumo

A proposta deste projeto é estudar e desenvolver um protótipo de acoplamento magnético constituído por ímãs permanentes. Para tanto, foram avaliados os métodos disponíveis na literatura para o cálculo da força de interação entre ímãs, com o intuito de elaborar uma ferramenta de cálculo que pudesse ser utilizada no projeto do acoplamento. Com essa ferramenta desenvolvida, puderam ser levantadas as curvas características do acoplamento e comparadas com os resultados experimentais do protótipo.

Palavras-chave: Acoplamento magnético. Ímã permanente. Força entre ímãs. Protótipo.

2. Introdução

Os acoplamentos magnéticos permanentes desempenham atualmente um papel importante em várias áreas de aplicação devido às suas características particulares. Uma dessas características é a de poder transmitir torque de um rotor a outro sem qualquer tipo de contato físico entre eles, reduzindo, portanto, perdas mecânicas. Além dessa característica, outra peculiaridade é o escorregamento que ocorre entre os rotores quando é aplicado um torque excessivo sobre o eixo. Dessa maneira, uma utilização bastante comum ocorre em ambientes perigosos ou corrosivos, nos quais não pode haver contato entre os diferentes meios e é necessário acionar ou operar um dispositivo, com a vantagem de poder ser empregado para evitar falhas mecânicas nos eixos devido à sobrecarga. Ademais, os acoplamentos magnéticos também permitem interligar eixos com razoável desalinhamento tanto axial quanto angular sem prejuízos em seu funcionamento, além de não transmitir vibrações entre os eixos.

3. Objetivo

O objetivo deste projeto é estudar e desenvolver um protótipo de acoplamento magnético constituído por ímãs permanentes. Para tanto, foram avaliados os métodos disponíveis na literatura para o cálculo da força de interação entre ímãs, com o intuito de elaborar uma ferramenta de cálculo que pudesse ser utilizada no projeto do acoplamento. Com o desenvolvimento dessa ferramenta, puderam ser levantadas as curvas características do acoplamento e comparadas com os resultados experimentais do protótipo. Para se atingir tal objetivo, dividiu-se o projeto nas seguintes etapas:

- 1) Definição da topologia de acoplamento magnético a ser estudada;
- 2) Desenvolvimento dos cálculos relativos ao projeto;
- 3) Elaboração dos desenhos de fabricação;
- 4) Montagem do protótipo de acoplamento magnético;
- 5) Realização de testes para averiguar se os resultados obtidos estão condizentes com a teoria.

4. Atualização bibliográfica

5.1 Topologias

A literatura descreve várias topologias para os acoplamentos magnéticos a ímãs permanentes. Entretanto, um acoplamento magnético consiste basicamente de dois rotores, sendo um deles ligado à força motriz (e, portanto, é aquele que conduz o movimento) e o outro ligado à carga (sendo conduzido pelo primeiro). Em ambos os rotores estão alojados ímãs permanentes de forma que existe uma posição estável e qualquer movimentação de um dos rotores implica num torque no sentido de reestabelecer a posição inicial. Esse torque é resultante das forças de atração e repulsão exercidas entre os ímãs, que por sua vez é devido ao deslocamento da posição estável.

As topologias mais comumente encontradas na literatura e empregadas em equipamentos industriais são duas: a configuração radial e a configuração axial. A primeira configuração pode ser visualizada nas Figuras 1 e 2, nas quais os ímãs adjacentes de um mesmo rotor possuem sentidos de magnetização contrários e os ímãs do outro rotor estão dispostos na mesma configuração a certa distância na direção radial da magnetização.

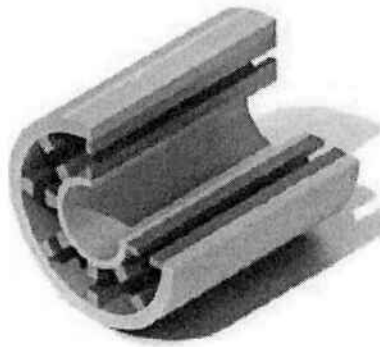


Figura 1 - Esquema tridimensional da configuração radial.

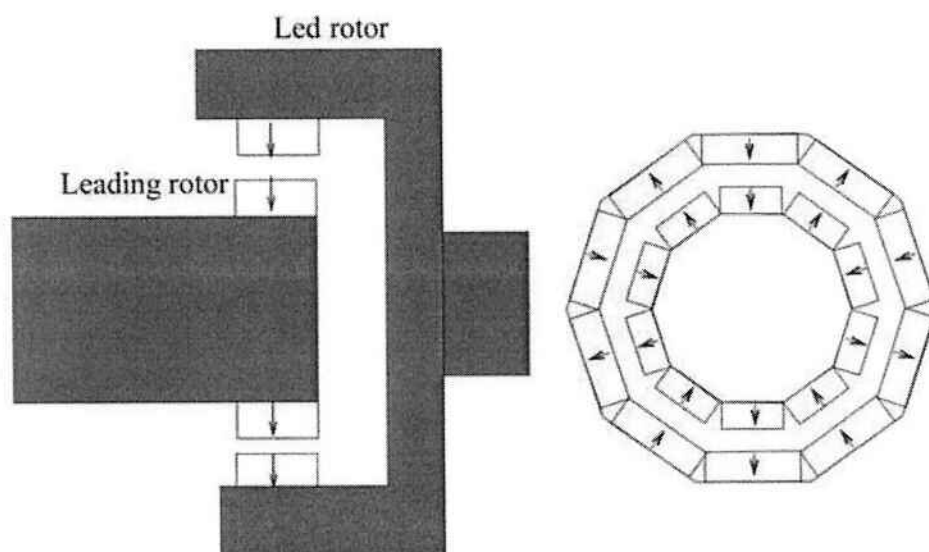


Figura 2 - Esquema bidimensional da configuração radial.

Nessa configuração radial, a força axial nos eixos é nula, pois a força de atração entre os ímãs atua radialmente nos eixos. Entretanto, é fácil notar que essa topologia possui uma alta instabilidade na direção radial, pois qualquer desvio dos eixos nessa direção implica um desequilíbrio nas forças de atração entre os ímãs. Isso ocorre, pois alguns ímãs se aproximariam (aumentando a força de atração entre os rotores, no sentido de deslocamento) e outros se afastariam (diminuindo a força de atração na parte oposta, que é contrária ao deslocamento).

A outra topologia muito utilizada é a configuração axial, ilustrada nas Figuras 3 e 4, cujos ímãs adjacentes de um mesmo rotor também possuem sentidos de magnetização contrários e os ímãs do outro rotor estão dispostos na mesma configuração a certa distância na direção axial da magnetização.

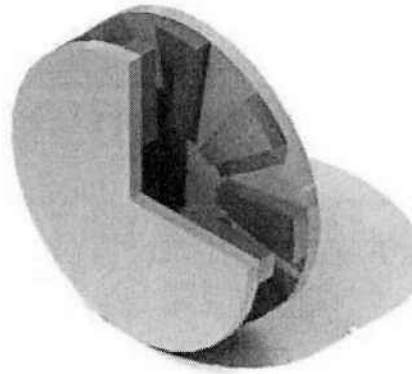


Figura 3 - Esquema tridimensional da configuração axial

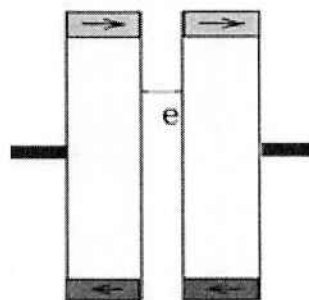


Figura 4 - Esquema bidimensional da configuração axial

Na configuração axial, existe uma alta força axial que é exercida nos eixos devido à atração entre os ímãs dos dois rotores, entretanto, essa configuração contribui para manter os rotores alinhados na posição central.

Além dessas duas topologias básicas, na literatura encontram-se algumas configurações variantes. Uma possível configuração com três coroas magnéticas está

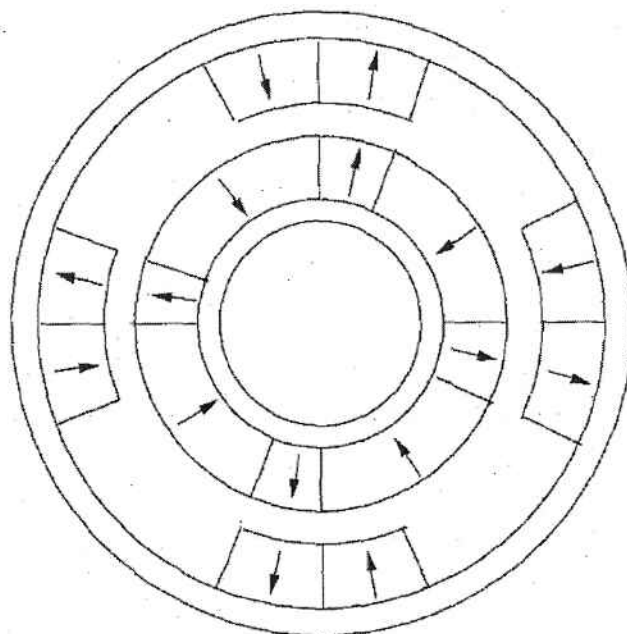


Figura 6 - Configuração com ímãs de diferentes comprimentos

5.2 Aplicações

As aplicações para os acoplamentos magnéticos a ímãs permanentes estão concentradas basicamente na área industrial. Exemplos dessas aplicações estão em eixos de motores que acionam bombas, sopradores, ventiladores e outros processos de fabricação que estão sujeitos a sobrecargas que podem bloquear o eixo. Assim sendo, como o acoplamento magnético possui a característica de transmitir até um determinado torque limite, que pode ser ajustável, então sua aplicação nesses processos é essencial para evitar danos ao motor devido à sobrecarga. Exemplos dessas aplicações podem ser visualizados nas Figuras 7, 8, 9, 10 e 11 que mostram, respectivamente, acoplamentos magnéticos utilizados em compressores, bombas para irrigação, bombas hidráulicas, ventiladores e esteiras transportadoras.



Figura 7 - Exemplo de aplicação do acoplamento magnético: compressor



Figura 8 - Exemplo de aplicação do acoplamento magnético: bombas para irrigação



Figura 9 - Exemplo de aplicação de acoplamento magnético: bomba hidráulica



Figura 10 - Exemplo de aplicação do acoplamento magnético: ventiladores



Figura 11 - Exemplo de aplicação do acoplamento magnético: esteira transportadora

Outra aplicação importante, que advém do fato do acoplamento magnético ser capaz de transmitir torque sem contato físico entre os rotores, é no acionamento de cargas que estão isoladas em tanques com alta pressão e/ou material corrosivo, tóxico

ou contaminante. Nessas aplicações, como é o caso de agitadores e bombas seladas, o emprego de um selo mecânico acaba sendo proibitivo em alguns casos, além de incorrer no risco de vazamentos e ter um custo associado à sua manutenção. Exemplos dessas aplicações estão ilustrados nas Figuras 12 e 13, que mostram, respectivamente, acoplamentos magnéticos empregados em agitadores e num protótipo de bomba artificial para o coração humano.



Figura 12 - Exemplo de aplicação do acoplamento magnético: misturadores



Figura 13 - Exemplo de aplicação do acoplamento magnético: bomba artificial para o coração humano

Além dessas aplicações mais importantes, os acoplamentos magnéticos também apresentam outras características peculiares que tornam ainda mais interessante a sua utilização. Como o seu princípio de funcionamento está baseado na interação entre os campos magnéticos dos ímãs e não há nenhum contato físico entre os rotores, os acoplamentos magnéticos são capazes de conectar eixos com relativo desalinhamento tanto na direção dos eixos (axial) quanto angular, conforme mostram as Figuras 14 e 15 respectivamente.

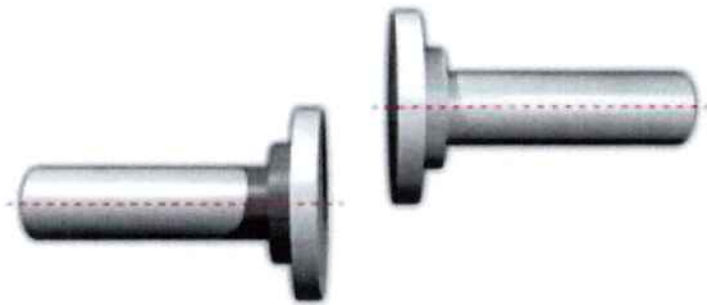


Figura 14 - Desalinhamento axial



Figura 15 - Desalinhamento angular

Cabe ressaltar que também é possível haver uma combinação desses dois tipos de desalinhamento sem perda notável do desempenho, dentro de certos limites evidentemente.

Além dessa característica de suportar desalinhamentos, os acoplamentos magnéticos possuem um baixo custo de manutenção, eliminam a transferência de vibrações entre a carga e o motor além de serem energeticamente eficientes na transmissão de torque por não possuírem contatos mecânicos.

5. Materiais e métodos

Para se realizar o desenvolvimento de um acoplamento magnético, inicialmente pesquisaram-se os critérios de projeto e de cálculo descritos pela literatura para computar as forças entre os ímãs permanentes. Os métodos encontrados foram basicamente o de elementos finitos (por exemplo, através do programa FLUX3D), que demandam muito tempo para a análise, e o analítico, que apresentam tempos de processamento bem inferiores mesmo quando se faz necessário uma integração numérica. Tendo em vista esses aspectos distintos, se optou por utilizar este segundo método para o cálculo.

Com essa metodologia, pode-se estudar o desempenho do acoplamento para as topologias axial e radial em termos do torque em função do ângulo de deslocamento. De posse dessas curvas, é possível identificar o parâmetro mais importante no projeto de um acoplamento magnético: o valor de seu máximo torque suportável, sem que ocorra o escorregamento.

5.1.Cálculo para a configuração radial

Com a formulação apresentada por Eliès e Lemarquand (1998), foi possível encontrar a força tangencial na configuração radial em função dos parâmetros mostrados na Figura 16.

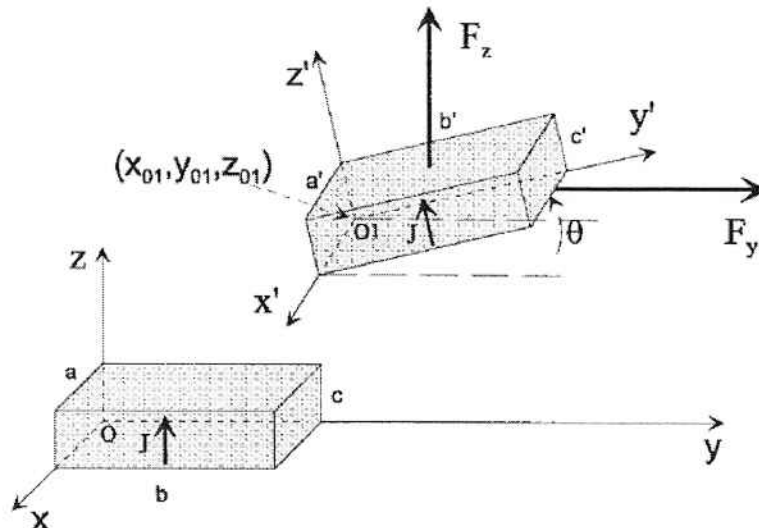


Figura 16 - Parametrização na configuração radial

Supondo o ímã 0 (dimensões a , b e c) com um de seus vértices na origem, o ímã 1 (dimensões a' , b' e c') com o vértice correspondente nas coordenadas (x_{01}, y_{01}, z_{01}) , com um ângulo θ em relação aos planos XOY e $X'O_1Y'$ e ambos os ímãs com magnetização J , tem-se a componente tangencial da força, $F_y(\theta, x_{01}, y_{01}, z_{01}, a, b, c, a', b', c', J)$, cuja expressão integral está mostrada no Anexo A.

Para a disposição dos ímãs no rotor conforme a Figura 17, pode-se ainda escrever as coordenadas (x_{01}, y_{01}, z_{01}) em função do ângulo de rotação ψ , do ângulo θ , da largura b do ímã e de r_2 (raio do ímã 0), resultando num equacionamento também mostrado no Anexo A.

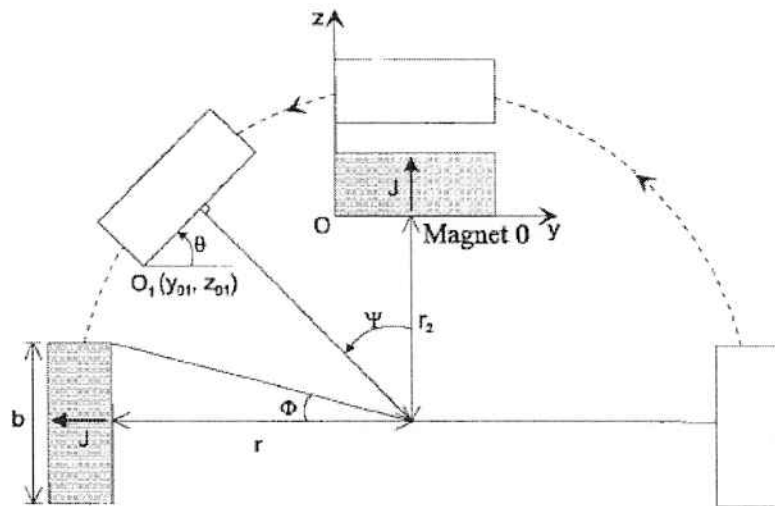


Figura 17 - Parâmetros para o cálculo radial no rotor

A obtenção do torque é imediata, bastando calcular a soma das forças tangenciais que todos os ímãs de um rotor exercem em um ímã do outro rotor e multiplicando-se esse valor pelo respectivo valor do raio e pelo número de ímãs em um rotor.

Como essa formulação é relativamente simples, programou-se o cálculo no MS Excel, através da definição de funções por meio de macros cujo código-fonte (em VBA, Visual Basic for Applications) está mostrado no Anexo B.

Uma vez programado, pode-se estruturar uma planilha do MS Excel para chamar a função F_y em várias células e, assim, calcular para diferentes parâmetros as forças e torques correspondentes.

5.2.Cálculo para a configuração axial

A partir dos estudos apresentados por Eliès e Lemarquand (1999) sobre os acoplamentos magnéticos com configuração axial, foi formulada a componente tangencial da força (F_y) entre os ímãs nessa configuração. Semelhante à topologia

radial, na configuração axial os parâmetros adotados são basicamente os mesmos, com a diferença de que o ângulo de rotação α está entre os planos XOZ e $X'O_1Z'$.

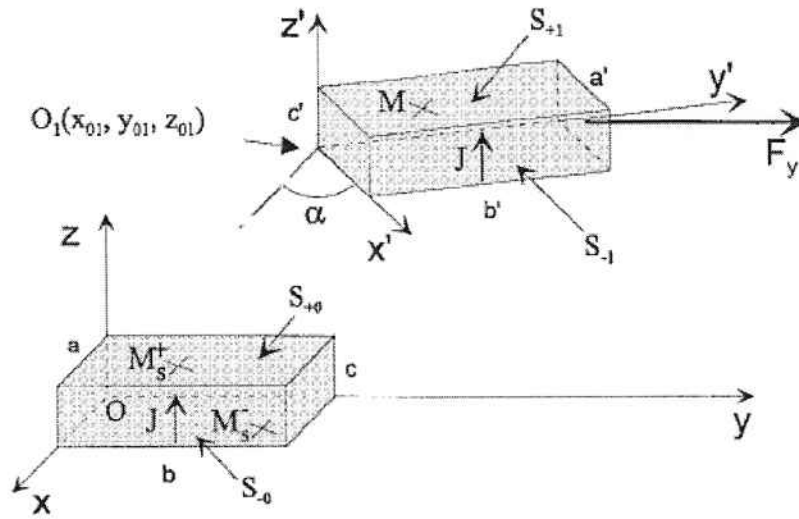


Figura 18 - Parametrização na configuração axial

Os parâmetros utilizados para o cálculo da força tangencial estão mostrados na Figura 18, na qual o ímã 0 de dimensões a , b e c está fixo com um de seus vértices na origem O . Já o ímã 1, de dimensões a' , b' e c' , possui o vértice correspondente no ponto O_1 , cujas coordenadas são (x_{01}, y_{01}, z_{01}) . Ademais, o ímã 1 está deslocado de um ângulo α em relação aos planos XOZ e $X'O_1Z'$ e ambos os ímãs possuem magnetização J em tesla. Essa parametrização é particularmente conveniente para a configuração axial, pois pode representar a posição de cada um dos ímãs dos rotores, variando-se α e o ponto O_1 .

Como a expressão de F_y não pode ser avaliada analiticamente como na configuração anterior (vide Anexo C, no qual está detalhado a sua formulação), então se teve que recorrer a técnicas de integração numérica disponíveis no Matlab. Os scripts utilizados nessa ferramenta para o cálculo de F_y estão mostrados no Anexo D.

6. Resultados

6.1. Configuração Radial

Utilizando-se a metodologia descrita no item 4.1, os primeiros resultados obtidos foram a da força tangencial em função do ângulo de rotação θ , como mostra a Figura 19. Nesse cálculo, utilizou-se o valor do campo magnético como de 1 Tesla e as seguintes dimensões: 1 m (profundidade do ímã) x 30 mm (largura do ímã) x 10 mm (comprimento do ímã), $r = 90$ mm (raio do ímã 1) e $r_2 = 70$ mm (raio do ímã 0).

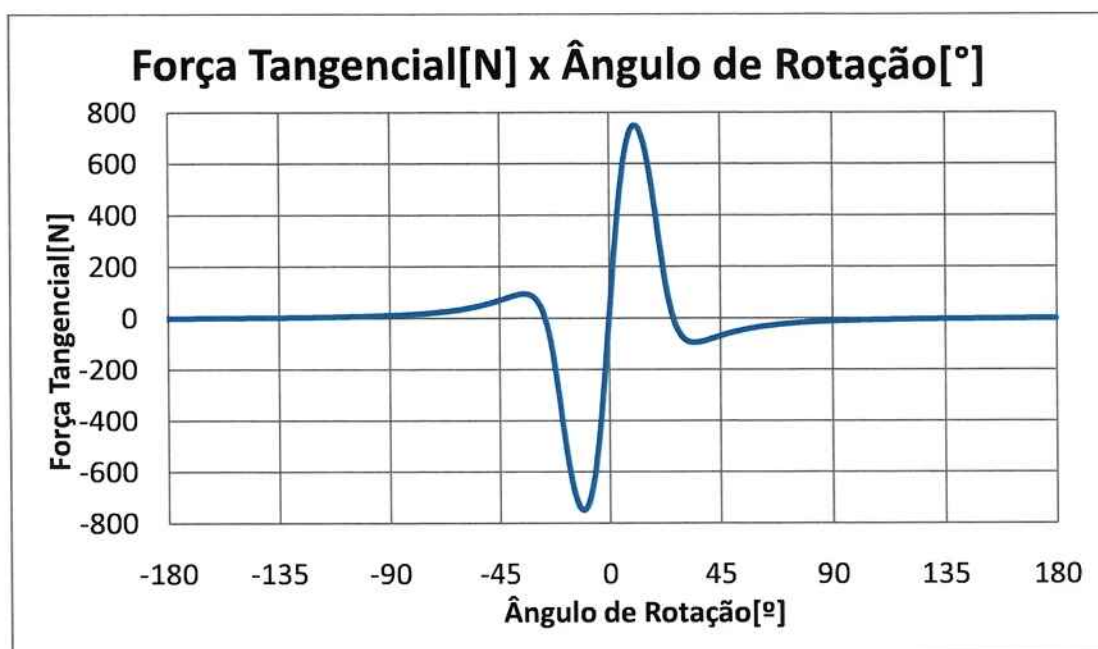


Figura 19 - Gráfico da força tangencial em função do ângulo de rotação θ

Em seguida, procedeu-se à obtenção da curva de torque em função do ângulo de rotação (Figura 20), para os seguintes parâmetros: $p = 2$ (número de pares de pólos), $J = 1$ T, $a = a' = 1$ m (profundidade do ímã), $b = b' = 0,114$ m (largura do ímã), $c = c' = 10$ mm (comprimento do ímã), $r = 90$ mm (raio do ímã 1) e $r_2 = 0,057$ m (raio do ímã 0).

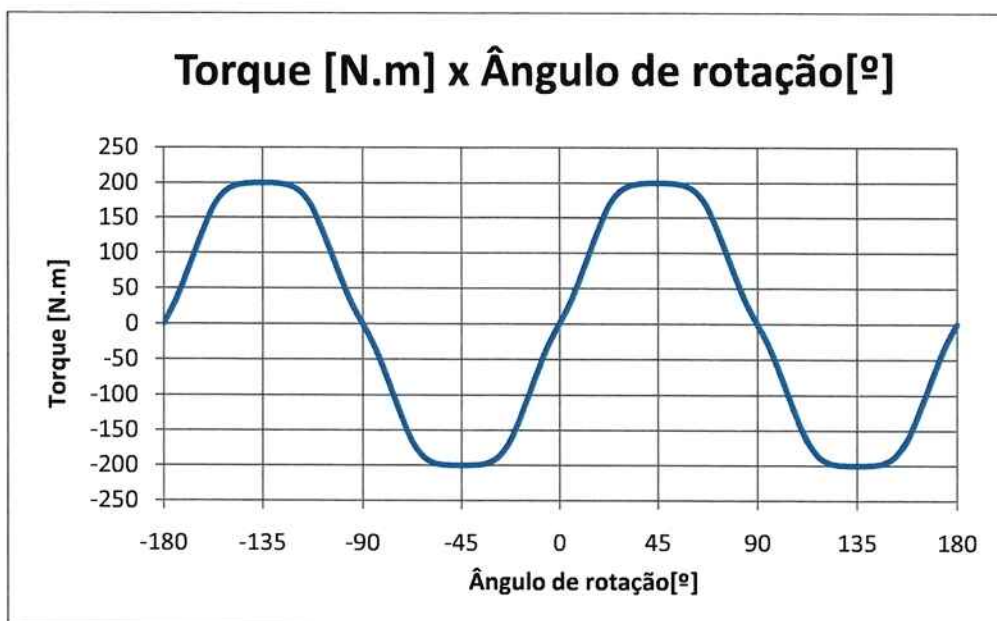


Figura 20 - Gráfico do torque em função do ângulo de rotação

Para os demais gráficos, manteve-se constante tais parâmetros com exceção do parâmetro a ser estudado (conforme Eliès e Lemarquand (1998)).

Considerando-se ainda um entreferro de 2 mm como um desses parâmetros, pode-se obter a curva do torque máximo (para o ângulo de rotação $\pi/2p$) em função do número de pólos, como mostra a Figura 21.

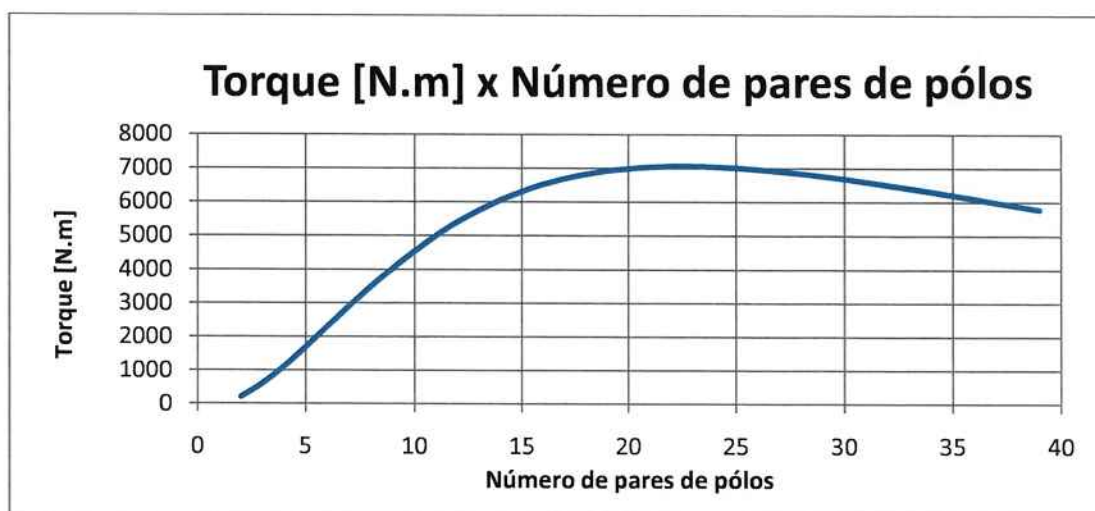


Figura 21 - Torque em função do número de pares de pólos

Além desses gráficos, também se levantou as curvas do torque em função do número de pólos para diferentes valores de entreferro, como mostrado na Figura 22 e do torque em função do comprimento (Figura 23) e da largura dos ímãs (Figura 24), para diferentes números de pares de pólos.

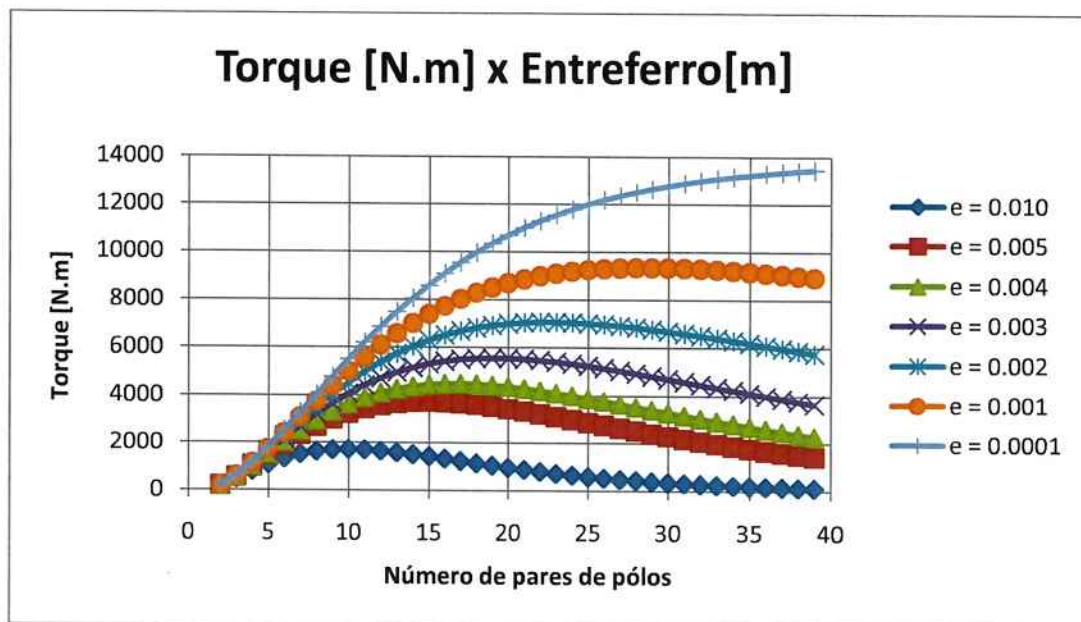


Figura 22 - Torque em função do entreferro

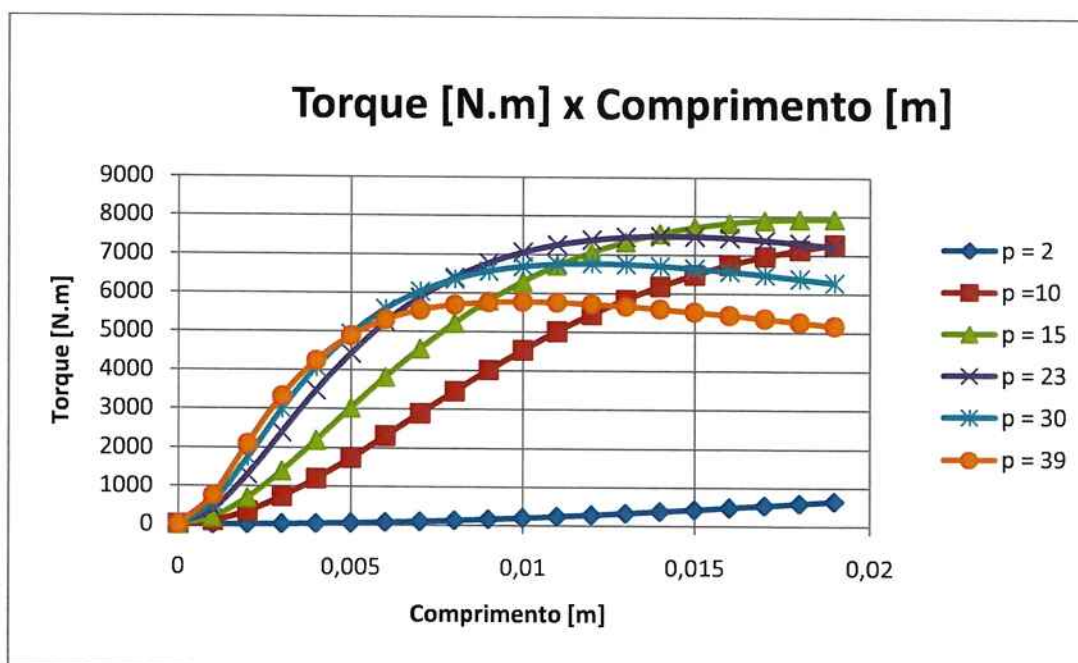


Figura 23 - Torque em função do comprimento

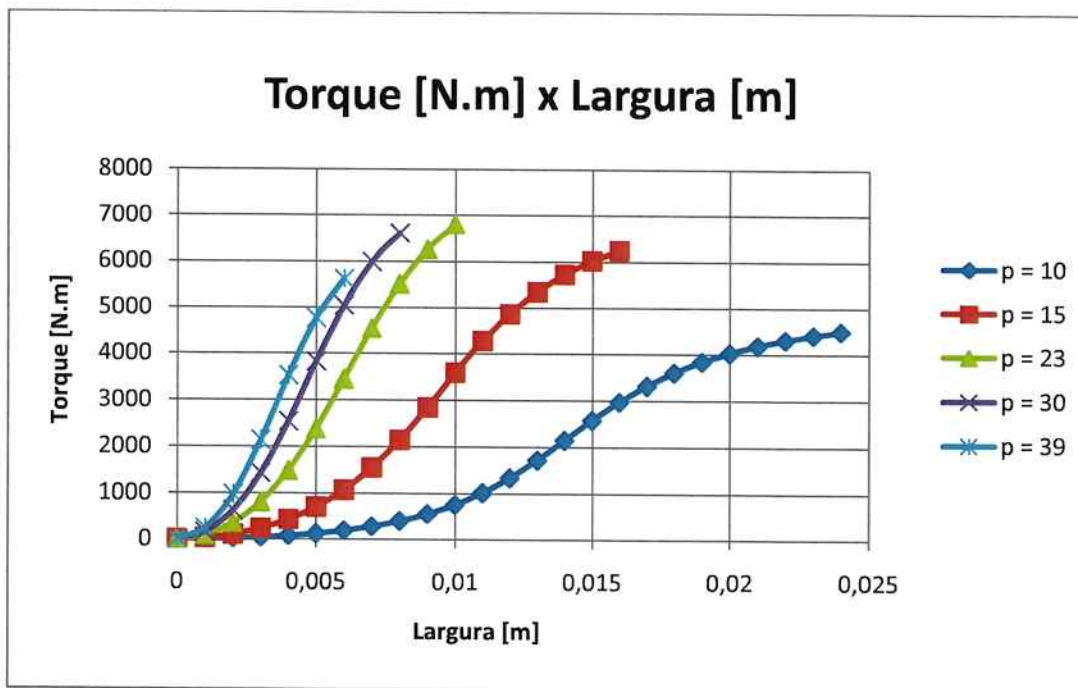


Figura 24 - Torque em função da largura

Cabe ressaltar que os gráficos das Figuras 19 a 24 foram exatamente os mesmos obtidos pelos autores da formulação do cálculo, validando, portanto, a metodologia empregada na programação em VBA.

6.2. Configuração Axial

Utilizando-se a metodologia descrita no item 4.2, a primeira curva obtida foi a da força tangencial em função do ângulo de rotação, como mostra a Figura 25. Nesse cálculo, utilizou-se $J = 1 \text{ T}$, $a = a' = 10 \text{ mm}$ (profundidade do ímã), $b = b' = 10 \text{ mm}$ (largura do ímã), $c = c' = 10 \text{ mm}$ (comprimento do ímã), $R = 90 \text{ mm}$ (raio dos ímãs) e o entreferro (e) igual a 2 mm.

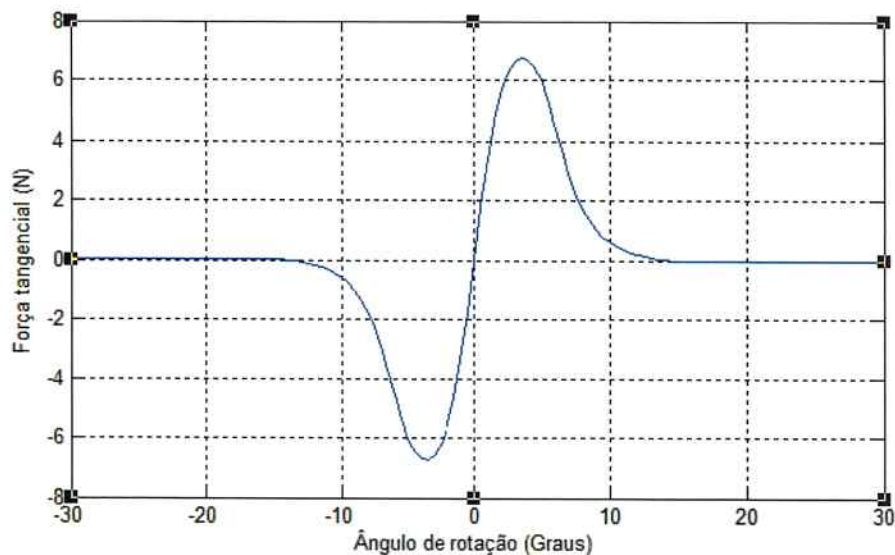


Figura 25 - Força tangencial em função do ângulo de rotação

É importante ressaltar que o gráfico da Figura 25 foi exatamente o mesmo obtido pelos autores da formulação do cálculo, validando, portanto, a metodologia empregada na programação em Matlab.

7. Projeto

Como as ferramentas para ambos os tipos de topologias foram desenvolvidas de forma satisfatória, então se pode escolher a configuração para o protótipo do acoplamento magnético com base em sua facilidade de execução. Embora a topologia axial apresente a desvantagem de possuir uma força axial de atração a ser compensada, ela possui maior facilidade para se fixar os ímãs do que a configuração radial. Ademais, essa força axial pode ser sustentada pelos mancais e os ajustes para se levantar as curvas para vários entreferros pode ser feito de forma simples, enquanto que na outra configuração seriam necessários diversos rotores para tanto.

Por esses motivos, escolheu-se a topologia axial no protótipo do acoplamento magnético.

7.1. Pré-projeto

A definição do tipo do ímã foi baseada em sua magnetização, custo e facilidade de fixação no rotor. Tendo em vista esses requisitos, foi adotado o ímã circular de neodímio-ferro-boro (NdFeB) de diâmetro de 16 mm e espessura de 5 mm, pois sua magnetização nominal está na faixa de 1,2 T, possui um custo baixo de aquisição e seu formato permite usar facilmente o rotor no qual será instalado.

Como as ferramentas desenvolvidas para o cálculo consideram ímãs de formato retangular, optou-se por determinar o ímã quadrado equivalente (de mesma área do ímã escolhido) ao invés de se refazer toda a formulação. Como essa formulação está baseada na interação entre as superfícies dos ímãs, pode-se assumir que tal aproximação não acarreta em desvios significativos. Assim, da equação (1) resulta o lado do ímã quadrado equivalente (l) utilizado no cálculo, sendo D o diâmetro do ímã adotado.

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = l^2 \Rightarrow \frac{\pi \cdot 16^2}{4} = l^2 \Rightarrow l = 14,1796mm \quad (1)$$

Outro aspecto importante a ser considerado é o efeito do material ferromagnético do rotor que serve de suporte aos ímãs. Como a permeabilidade magnética desse material é muito maior do que a do ar, as linhas do campo magnético dos ímãs tendem a se concentrar no material ferromagnético, ampliando, portanto, o seu efeito. Dessa forma, pelo método das imagens pode-se substituir esse material ferromagnético pela

imagem do ímã, resultando no dobro de sua espessura para efeitos de cálculo (YONNET et al., 1993), conforme Figura 26.

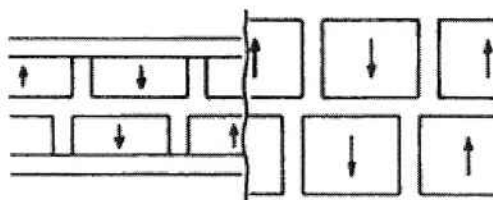


Figura 26 - Efeito do material ferromagnético no acoplamento

Assim, o modelo do ímã equivalente utilizado no cálculo resulta nas dimensões 14,1796 x 14,1796 x 10 mm.

Fixada as dimensões do ímã, sua disposição no rotor foi parametrizada em função da relação comprimento angular do ímã (b) pelo passo polar ($\tau_p = \pi/p$), denominada RDP. Sendo r_1 a distância do centro do rotor até o centro do ímã, tem-se a Equação 2, deduzida no anexo E.

$$r_1 = \frac{D_{ímã}}{2 \cdot \text{sen}\left(\frac{RDP \cdot \pi}{2 \cdot p}\right)} \quad (2)$$

Adotando-se inicialmente RDP igual a 2/3, valor comumente empregado no projeto de máquinas elétricas para minimizar a dispersão de fluxo entre os pólos, determinou-se o número de pólos que resultaria em um rotor de dimensões razoáveis, levando-se em consideração sua exeqüibilidade. Assim, chegou-se em oito pares de pólos ($p=8$) e $r_1=61,2904\text{mm}$.

Devido à flexibilidade proporcionada pelo programa em Matlab (scripts), pode-se estudar o comportamento do torque em função de RDP para que não houvesse dispersão do fluxo de um ímã para os ímãs adjacentes devido à proximidade entre eles. Constatou-se que o valor de RDP que maximiza o torque para os parâmetros adotados foi de 0,7, sendo o novo valor de $r_1=58,3889\text{mm}$.

Assim, definidos a geometria e os parâmetros do acoplamento magnético, puderam ser levantadas as curvas, para 1 mm de entreferro, da força tangencial (entre dois ímãs usados no cálculo) e do torque como funções do ângulo de rotação, mostradas nas Figuras 27 e 28, respectivamente.

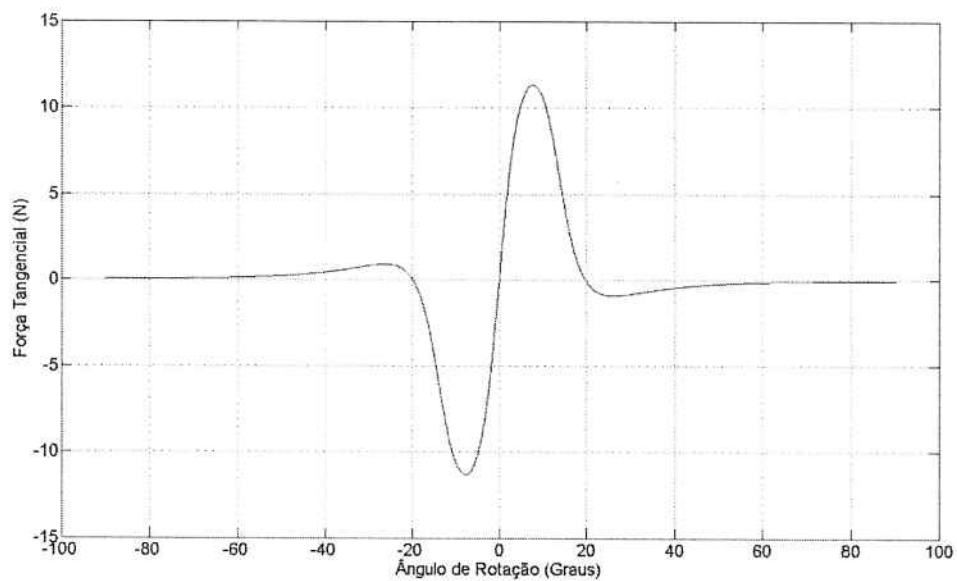


Figura 27 - Gráfico da força tangencial entre um par de ímãs em função do ângulo de rotação para um entreferro de 1mm

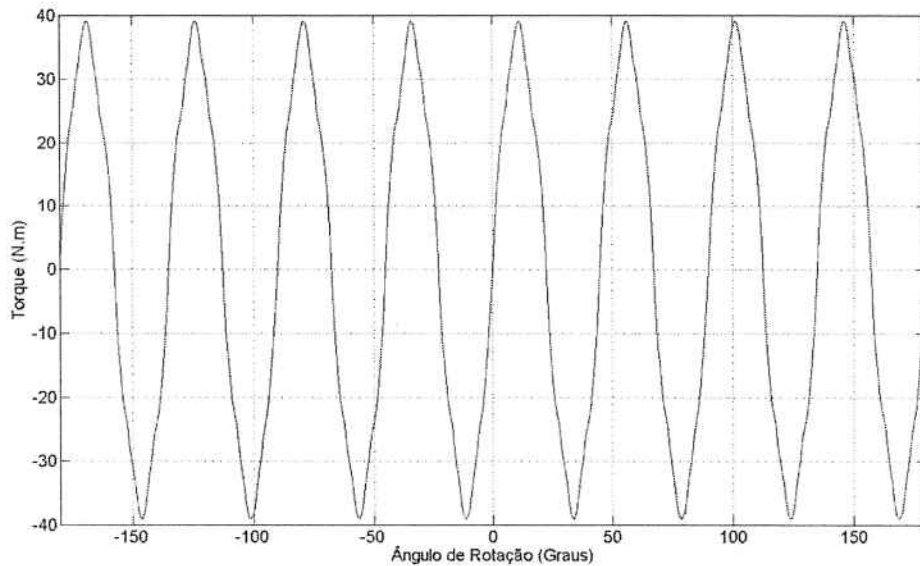


Figura 28 - Gráfico do torque em função do ângulo de rotação para o acoplamento magnético com 16 pólos e 1 mm de entreferro

O comportamento do gráfico da Figura 28 pode ser explicado com base na posição relativa entre os ímãs e no número de pólos. Analisando-se o intervalo do ângulo de rotação que vai desde 0° a +45° (correspondente a dois passos polares), nota-se que o torque parte de um valor nulo (posição de equilíbrio estável), passa por um máximo (torque positivo), atinge novamente um valor nulo (posição de equilíbrio instável, entretanto), passa por um mínimo (torque negativo) e finalmente atinge outra posição de equilíbrio estável.

Essa posição de equilíbrio estável pode ser explicada pelo fato de que, nessa situação, os ímãs dos diferentes rotores estão se atraindo, de forma que um deslocamento em qualquer um dos sentidos faz com que os ímãs se alinhem novamente.

A posição na qual temos um torque máximo pode ser explicada pelo fato de que nessa posição, os ímãs de um determinado rotor são atraídos pelos ímãs do outro

rotor que antes estavam pareados com eles e repelidos pelos vizinhos desses com igual intensidade. Ambos os torques exercidos são no sentido de restabelecer a posição inicial.

Já na posição de equilíbrio instável, os ímãs de um rotor repelem os ímãs do outro rotor (e vice-versa) exercendo uma força axial apenas. Nessa situação, as faces dos ímãs voltadas para fora possuem o mesmo pólo magnético das faces correspondentes dos ímãs do outro rotor.

A posição de torque mínimo é equivalente à posição de torque máximo, com a diferença que o sentido do torque é contrário. Dessa forma, a tendência do movimento é de estabelecer uma nova posição de equilíbrio estável.

Outro ponto importante mostrado no gráfico da Figura 28 é que o comportamento descrito repete-se oito vezes, como era de se esperar, pois é igual número de pares de pólos e, logo, o número de interações entre eles.

7.2. Modelamento em AutoCAD

Com a definição das dimensões básicas do protótipo do acoplamento magnético, foi possível passar para a fase de detalhamento do projeto. Nessa etapa, todos os aspectos construtivos foram levados em consideração para então realizar o modelamento através do AutoCAD2009® e elaborar os desenhos de execução.

As Figuras 29 a 31 mostram, respectivamente, o modelamento do suporte dos ímãs, do rotor e do suporte do rotor.

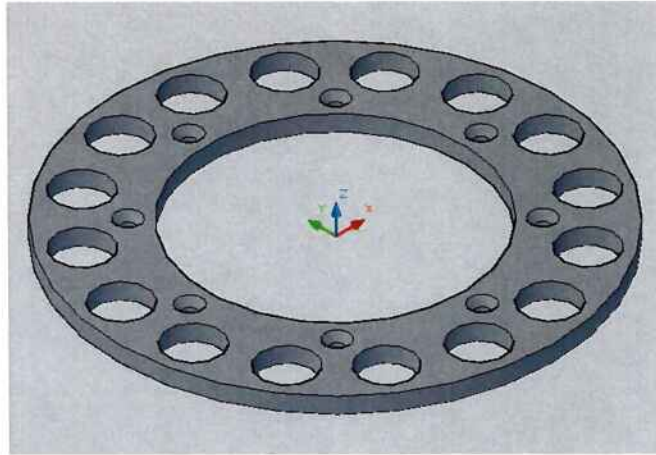


Figura 29 - Modelamento do suporte dos ímãs no rotor

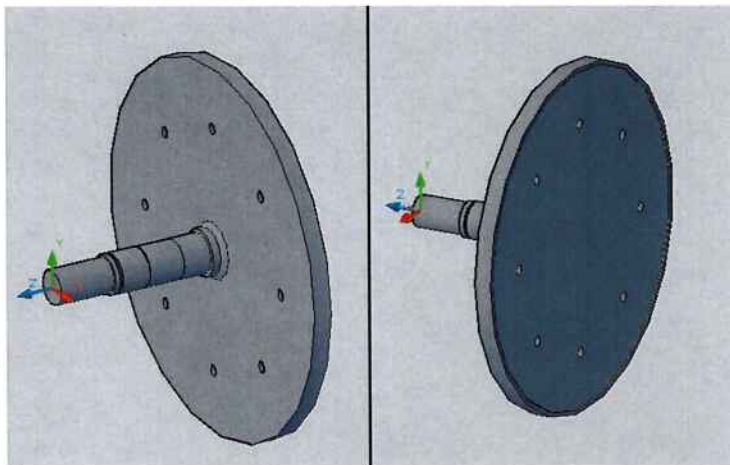


Figura 30 - Modelamento do rotor

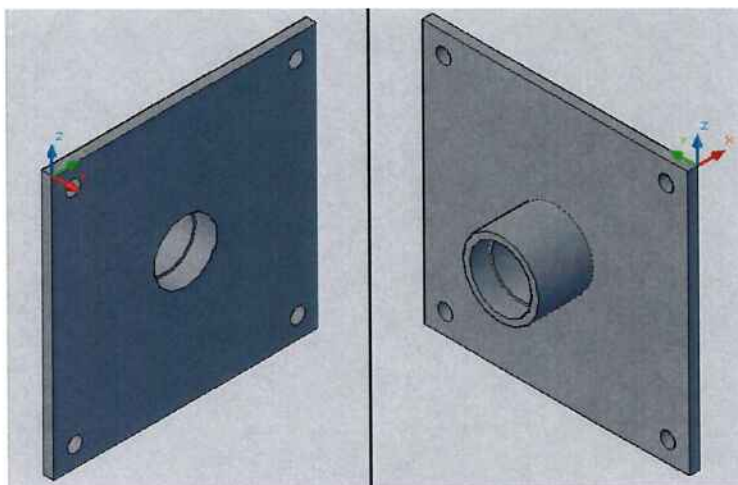


Figura 31 - Modelamento do suporte do rotor

A partir do modelamento das peças individuais, procedeu-se à montagem no próprio ambiente virtual, de forma que na Figura 32 é possível observar o suporte dos ímãs fixado no rotor com oito parafusos de cabeça chata e com os dezesseis ímãs fixados. Ademais, a Figura 32 também ilustra o suporte do rotor, que serve de apoio através de dois rolamentos rígidos de esferas de designação 6202-2Z. Além dessas características, é importante ressaltar que existe uma ranhura no eixo do rotor para um anel de retenção, cuja função é transmitir a força axial de atração entre os rotores para o rolamento, que por sua vez está apoiado ao suporte do rotor.

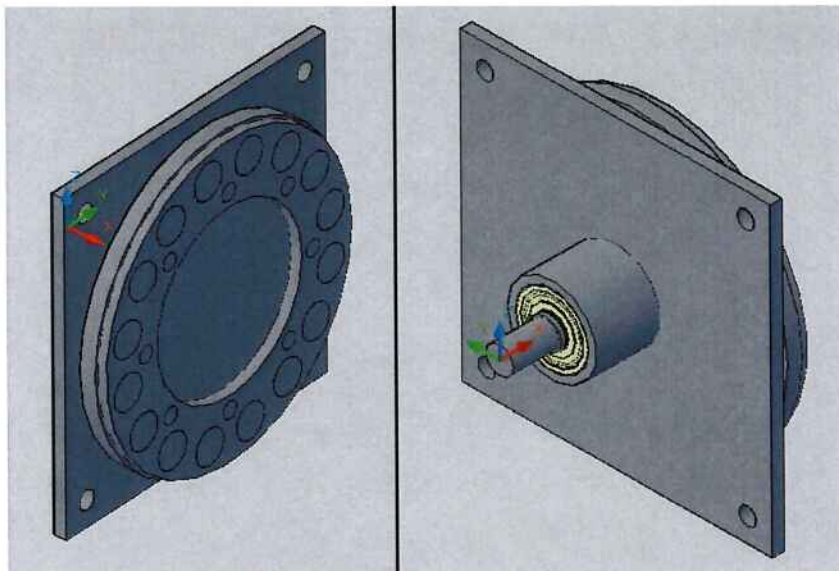


Figura 32 - Modelamento da montagem de um dos lados do acoplamento magnético

A Figura 33 mostra o modelamento da montagem final do acoplamento magnético, que consiste em dois dos conjuntos mostrados na Figura 32 interligados por quatro barras roscadas e dezesseis porcas de fixação, que prendem os suportes dos rotores. Através desses elementos de fixação é possível fazer o ajuste do entreferro entre os rotores, que é necessário durante a etapa de testes.

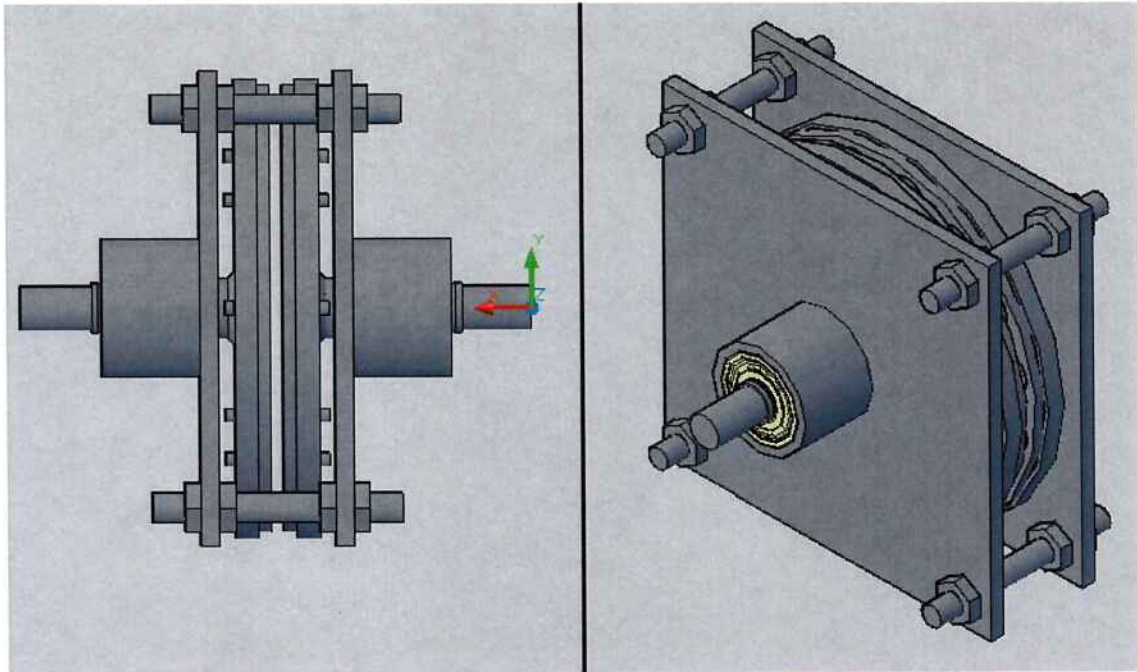


Figura 33 - Modelamento da montagem final do acoplamento magnético

Terminado o modelamento em AutoCAD, foram feitos os desenhos de execução de cada uma das peças do acoplamento magnético a partir do modelamento das peças individuais. Tais desenhos estão mostrados no Anexo F.

7.3.Execução do protótipo

Com o projeto e os desenhos de execução prontos, as peças foram fabricadas pela empresa Equacional Elétrica e Mecânica LTDA. Os resultados estão mostrados na Figuras 34, na qual é possível observar os dois suportes dos ímãs do rotor na parte inferior, os dois rotores ao centro e os respectivos suportes na parte superior da imagem.



Figura 34 – Peças fabricadas do acoplamento magnético

As demais peças do acoplamento magnético estão mostradas nas Figuras 35 e 36, que mostram respectivamente os ímãs de neodímio utilizados e os rolamentos rígidos de esferas de designação 6202-2Z.



Figura 35 - Ímãs de neodímio empregados no acoplamento magnético



Figura 36 - Rolamentos utilizados no acoplamento magnético

De posse das peças individuais do acoplamento magnético, procedeu-se à sua montagem, iniciando-se pela fixação do suporte dos ímãs no rotor através de parafusos de cabeça chata. Em seguida, para se evitar eventuais desprendimentos dos ímãs, esses foram colados no rotor com cola epóxi, tomando-se o cuidado de se alternar o pólo ao colocá-los no rotor. Após essa etapa, os rolamentos foram colocados no suporte do rotor e o rotor montado foi encaixado em seu eixo. Para finalizar a montagem dessa metade do acoplamento magnético, foi introduzido o anel de retenção em sua respectiva ranhura logo após o rolamento externo. Os resultados estão mostrados nas Figuras 37 e 38, na qual estão mostrados a parte dos ímãs no rotor e o detalhe do anel de retenção, respectivamente.



Figura 37 - Montagem de um dos rotores do acoplamento magnético



Figura 38 - Detalhe de montagem do anel de retenção

Após a montagem de uma das metades do acoplamento magnético, procedeu-se à segunda parte, seguindo os mesmos passos da metodologia descrita anteriormente. As duas partes do acoplamento estão mostradas na Figura 39.

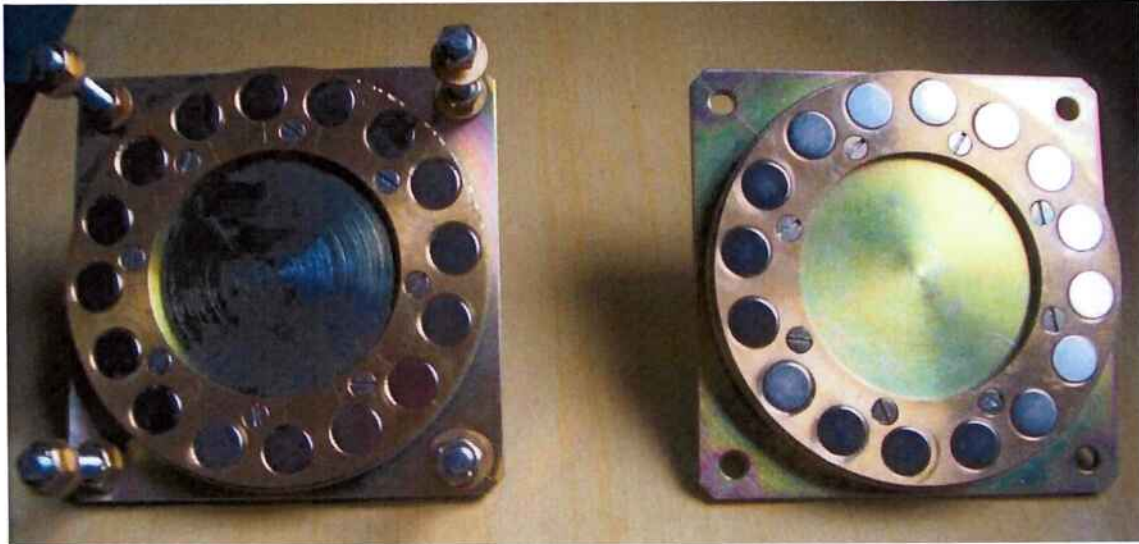


Figura 39 - Rotores montados em seus respectivos suportes

O passo seguinte foi a montagem final do acoplamento magnético, tendo o cuidado de se ajustar as porcas num mesmo nível, de forma a equilibrar o suporte apoiado nelas. O resultado está mostrado na Figura 40.

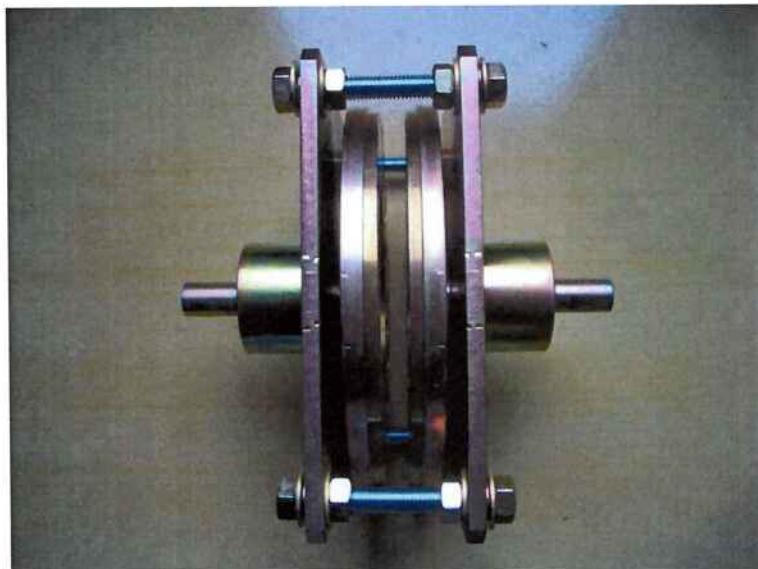


Figura 40 - Montagem final do protótipo do acoplamento magnético

8. Testes

Terminada a montagem do protótipo do acoplamento magnético, puderam ser realizados os testes para averiguar se a ferramenta de cálculo condizia com a realidade. Para tanto, foram levantadas as curvas características do acoplamento para vários entreferros, isto é, as características de torque em função do deslocamento angular para várias distâncias entre os rotores.

A medição do deslocamento angular foi realizada através de uma fita milimetrada fixada na borda de um dos rotores e de um cursor de grafite fixado na borda do outro rotor. Com esse arranjo, que está mostrado na Figura 41, foi possível calcular o deslocamento angular através do deslocamento medido com a fita e do diâmetro do rotor.

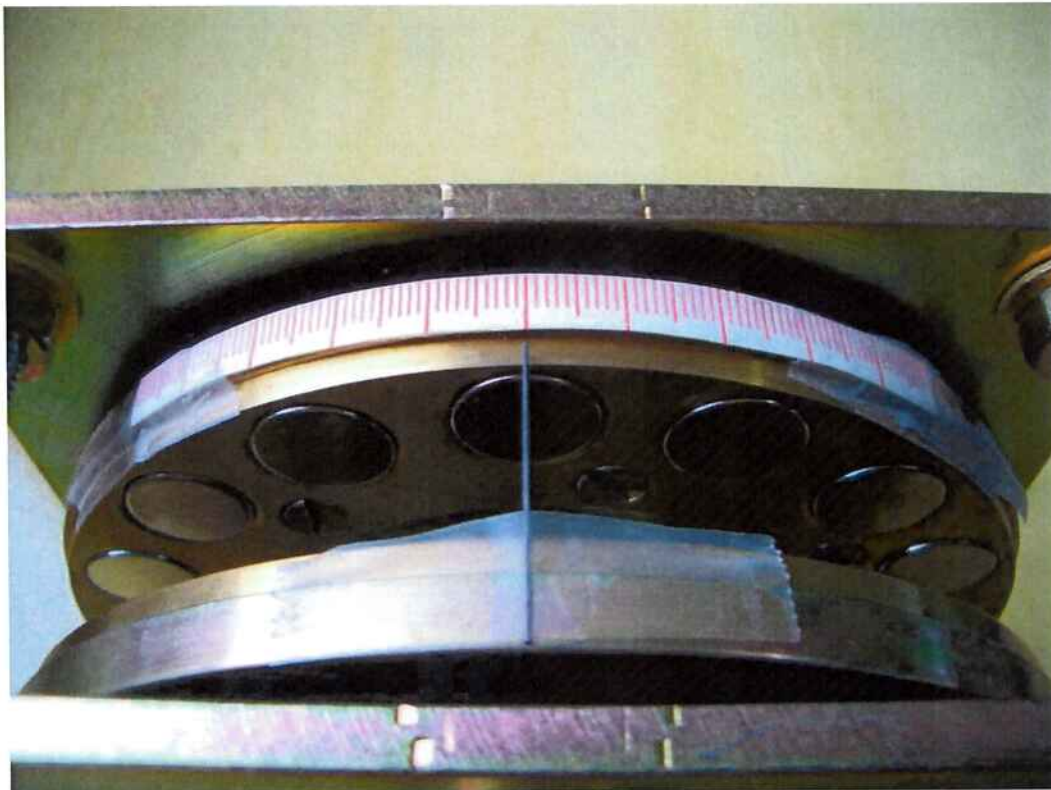


Figura 41 - Arranjo para a medição do deslocamento angular

A medição do torque foi feita acrescentando-se dois braços nas extremidades dos eixos do acoplamento fixados através de parafusos como mostrado na Figura 42.

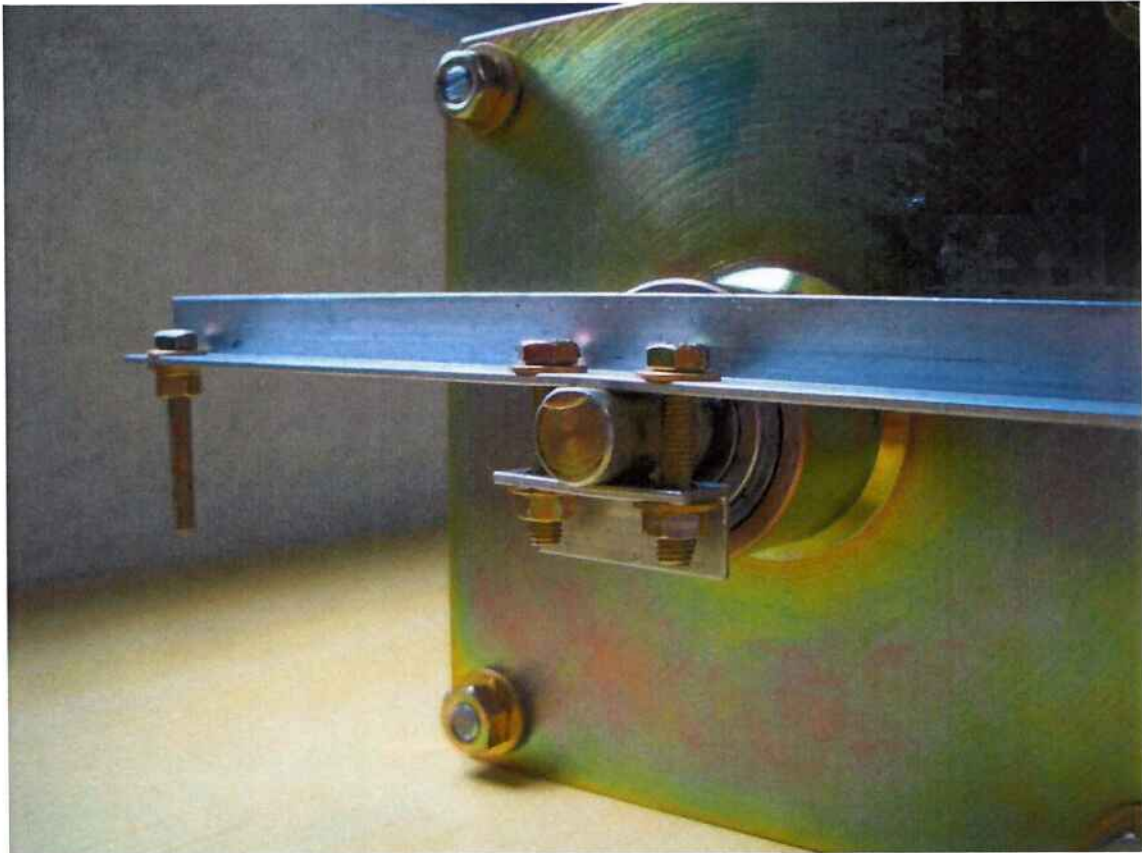


Figura 42 - Detalhe da fixação do braço no eixo do acoplamento

Em uma das extremidades do braço foi acrescentado um parafuso, que serve de apoio para manter o braço na horizontal, e na outra extremidade, tem-se um furo localizado a 100 mm do centro do eixo para pendurar a carga. Esse arranjo está mostrado na Figura 43.



Figura 43 - Arranjo completo do acoplamento para as medições

A aplicação da carga foi feita através de um recipiente de massa conhecida fixado por uma corda no furo do braço. Com essa configuração, foi possível acrescentar volumes de água conhecidos e, portanto, massas conhecidas, e medir o deslocamento através da fita milimetrada. Com esse deslocamento medido foi possível calcular o deslocamento angular correspondente e com o volume de água no recipiente e a massa do mesmo, o torque resultante. Dessa maneira, foram levantadas as curvas do torque em função do ângulo de deslocamento para entreferros de 19, 16, 13, 10 e 8 mm, como mostrado no gráfico da Figura 44. Além das curvas obtidas experimentalmente, o gráfico da Figura 44 também mostra as curvas calculadas pela ferramenta desenvolvida.

Gráfico do Torque [N.m] x Ângulo de deslocamento [°]

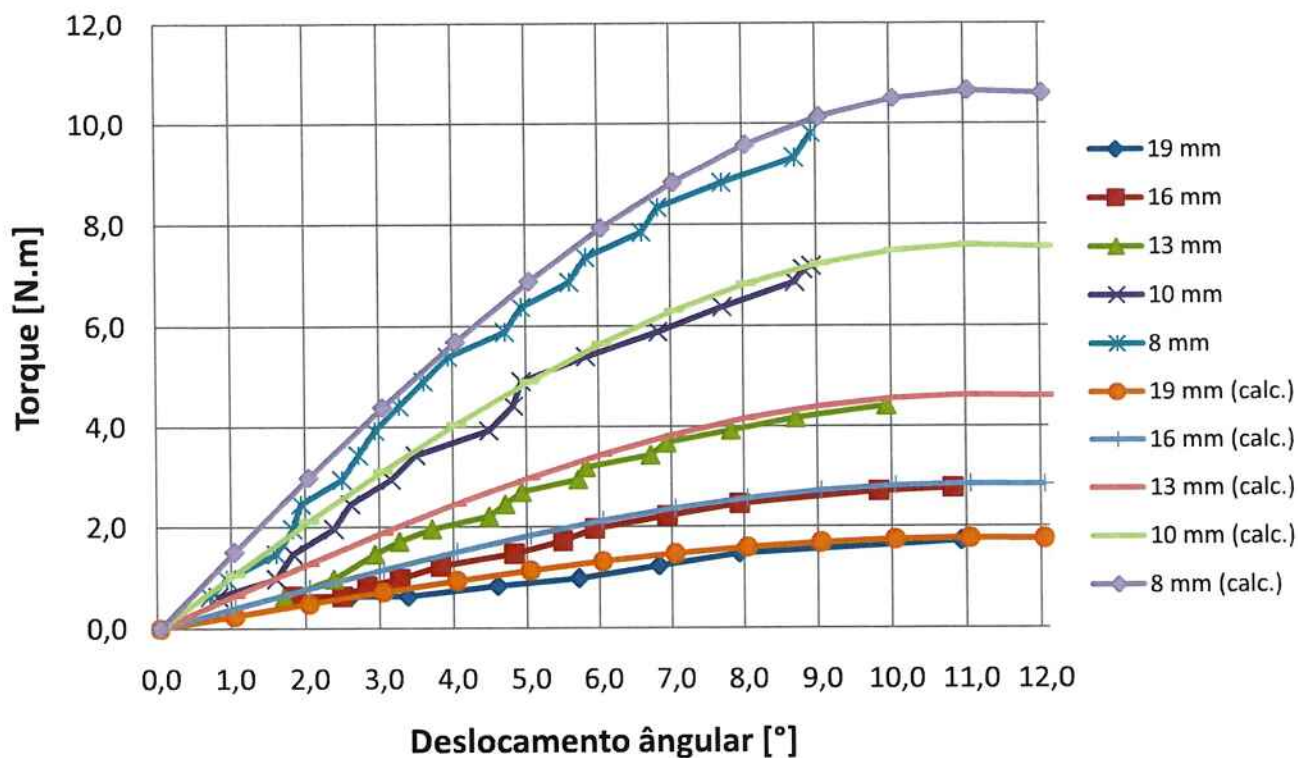


Figura 44 – Comparação entre o torque medido e calculado em função do deslocamento angular para vários entrefeitos

Como é possível observar no gráfico da Figura 44, a ferramenta de cálculo desenvolvida apresentou resultados muito próximos das curvas levantadas experimentalmente, validando, portanto, a metodologia de cálculo empregada pela ferramenta.

Cabe ressaltar que para deslocamentos angulares negativos, isto é, deslocamentos no sentido oposto em relação ao adotado, os resultados foram os mesmos, assim optou-se por não repetir os dados na Figura 44 para uma melhor visualização.

Além desse ponto, também é importante ressaltar que para deslocamentos maiores que meio passo polar (11,25°), ou seja, além do torque máximo, a medição se

torna impraticável, pois qualquer vibração acaba deslocando o rotor ligado à carga de sua posição estável.

9. Conclusão

Na primeira parte do trabalho realizado, foi possível constatar a grande variedade de aplicações nas quais os acoplamentos magnéticos a ímãs permanentes desempenham papel fundamental. Ademais, possuem várias características peculiares que os tornam ainda mais interessantes sob vários aspectos, como por exemplo, o seu baixo custo de manutenção e ausência de perdas mecânicas por não possuir contatos mecânicos.

Na segunda parte do trabalho, identificaram-se os diversos métodos para computar a força entre os ímãs permanentes, optando-se por implementar o método de cálculo mais rápido e versátil. Após a programação do método analítico, fez-se uma análise de sensibilidade dos principais parâmetros que influem no desempenho do acoplamento, o que permitiu a sua otimização dentro de certos parâmetros para manter sua exeqüibilidade.

Na terceira parte do trabalho, foi feito o projeto do acoplamento magnético, passando-se pelas etapas de detalhamento, modelagem em AutoCAD e elaboração dos desenhos de execução. Nessas tarefas, foi possível ter um maior contato com os aspectos que envolvem a construção de um protótipo assim como sua documentação.

Na quarta parte do trabalho, execução do protótipo do acoplamento magnético, montou-se o acoplamento a partir das peças usinadas e das demais partes adquiridas. Nessa parte do trabalho, foi necessário adquirir certa habilidade com o manuseio dos

ímãs de neodímio, devido sua alta força de atração e de repulsão, dependendo do caso. Com o protótipo montado, foi interessante observar seu funcionamento mesmo com valores elevados de entreferro, revelando sua grande capacidade de transmitir torque.

Na última parte do trabalho, foram levantadas as curvas experimentais do acoplamento magnético o que comprovou o desempenho do protótipo como previsto pela ferramenta de cálculo. É importante destacar que para menores valores de entreferro seria necessário um recipiente com capacidade superior a 10 litros para se levantar a curva adequadamente, o que é algo surpreendente para um protótipo com essas dimensões.

Em suma, com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que a metodologia empregada para o desenvolvimento da ferramenta de cálculo é realmente precisa. Além dessa qualidade, também é possível apontar como pontos positivos o menor tempo de processamento e maior flexibilidade se comparado com métodos puramente numéricos, como é o caso da programação por meio de elementos finitos.

Para se ilustrar o desempenho desse protótipo de acoplamento magnético, com um entreferro de 8 mm por exemplo, a capacidade máxima de torque é um pouco superior a 10 N.m. Isto significa que tal acoplamento pode transmitir uma potência em torno de 3,7 kW (5 CV) em uma rotação de 3600 RPM. Já para um entreferro de 1 mm, a capacidade de transmissão se aproxima de 15 kW (20 CV) na mesma rotação.

10. Propostas para continuação dos estudos

Tendo em vista a validação da metodologia empregada no cálculo do acoplamento magnético através dos testes realizados, podem-se estender os estudos realizados para uma análise do desempenho do acoplamento na presença de uma barreira entre os rotores do mesmo. Assim, poderão ser estudadas as perdas por correntes parasitas de Foucault numa barreira ferro-magnética e o impacto de sua presença na curva característica do acoplamento. Dessa forma, será um estudo voltado para suas aplicações típicas, como mostradas no subitem 5.2 deste trabalho.

11. Referências bibliográficas

Charpentier, J.F. and Lemarquand, G. (2001), "Calculation of ironless permanent magnet couplings using semi-numerical magnetic pole theory method", COMPEL, Vol. 20 No.1 pp 72-89.

Elies, P. and Lemarquand, G. (1998), "Analytical optimization of the torque of a permanent magnet coaxial synchronous coupling", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34 No. 4, pp. 2267-73.

Yonnet, J.P. (1981), "Permanent magnet bearings and couplings", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 17 No. 1, pp. 1169-73.

Wu, W., Lovatt, C. and Dunlop, J.P. (1997), "Analysis and design of magnetic couplings using 3D finite element modeling", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33 No. 5, pp. 4083-5.

Bancel, F. and Lemarquand, G. (1998), "3D analytical optimization of permanent magnet alterned structure", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34 No. 1, pp. 242-8.

Eliès, P. and Lemarquand, G. (1999), "Comparison of the Torque of Flat Airgap Synchronous Couplings Versus the Magnetization Direction of the Magnets" , IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35 No. 1, pp. 548-556

Charpentier, J.F. and Lemarquand, G. (1999), "Optimal design of cylindrical air-gap synchronous permanent magnet couplings", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35 No. 2, pp. 1037-46.

Lemarquand, V., Charpentier, J.F. and Lemarquand, G. (1999), "Non sinusoidal torque permanent Magnet couplings", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35 No. 5, pp. 4200-5.

12. Anexos

12.1. Anexo A – Fórmulas para a configuração radial

Para uma disposição genérica entre os ímãs, o cálculo da força tangencial entre eles envolve os seguintes parâmetros mostrados na Figura 45.

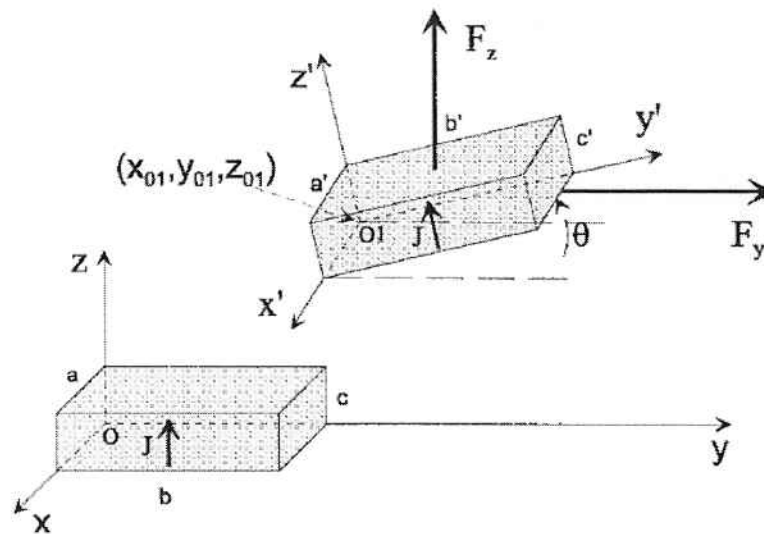


Figura 45 - Parâmetros na configuração radial

Devido à extensão da fórmula para o cálculo da componente tangencial da força entre os ímãs na configuração radial (F_y), essa foi dividida nas funções intermediárias f_1 a f_6 de forma recursiva.

$$\begin{aligned}
 F_y(\theta, x_{01}, y_{01}, z_{01}, a, b, c, a', b', c', J) = & \\
 - f_1(x_{01}, x_{01} + a', y_{01}, z_{01}, \theta, 0, 0, b', c', J) & \\
 + f_1(x_{01} - a, x_{01} - a + a', y_{01}, z_{01}, \theta, 0, 0, b', c', J) & \\
 - f_1(x_{01} - a, x_{01} - a + a', y_{01}, z_{01}, \theta, b, 0, b', c', J) & \\
 + f_1(x_{01}, x_{01} + a', y_{01}, z_{01}, \theta, b, 0, b', c', J) & \\
 - f_1(x_{01} - a, x_{01} - a + a', y_{01}, z_{01}, \theta, 0, c, b', c', J) & \\
 + f_1(x_{01}, x_{01} + a', y_{01}, z_{01}, \theta, 0, c, b', c', J) & \\
 - f_1(x_{01}, x_{01} + a', y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, b', c', J) & \\
 + f_1(x_{01} - a, x_{01} - a + a', y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, b', c', J) &
 \end{aligned}$$

$$f_1(v, w, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, b', c', J) = \frac{J^2}{4 \cdot \pi \cdot \mu_0} \cdot [f_2(v, w, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, b', c') - f_2(v, w, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, b', 0)]$$

$$f_2(v, w, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, b', z') = + f_4(w, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, b', z') - f_4(v, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, b', z') - f_4(w, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, 0, z') + f_4(v, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, 0, z')$$

$$f_3(u, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y', z') = \sqrt{u^2 + f_5^2(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, z') + f_6^2(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y')}$$

$$f_4(u, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y', z') = u \cdot f_6(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y') \cdot \ln[-u + f_3(u, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y', z')] - u \cdot f_6(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y') - u^2 \cdot \ln[f_3(u, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y', z') + f_6(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y')] + u \cdot f_5(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, z') \cdot \arctan\left(\frac{-f_5^2(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, z') - u^2 + u \cdot f_3(u, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y', z')}{f_5(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, z') \cdot f_6(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y')}\right) + \frac{1}{2} \cdot u \cdot \pi \cdot |f_5(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, z')| \cdot \text{sgn}[f_6(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y')] + \frac{1}{2} \cdot f_6(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y') \cdot f_3(u, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y', z') + \frac{1}{2} \cdot [u^2 + f_5^2(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, z')] \cdot \ln[f_3(u, y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y', z') + f_6(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y')]$$

$$f_5(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, z') = -y_{01} \cdot \sin(\theta) + z_{01} \cdot \cos(\theta) + b \cdot \sin(\theta) - c \cdot \cos(\theta) + z'$$

$$f_6(y_{01}, z_{01}, \theta, b, c, y') = y_{01} \cdot \cos(\theta) + z_{01} \cdot \sin(\theta) - b \cdot \cos(\theta) - c \cdot \sin(\theta) + y'$$

Estabelecendo-se a posição relativa entre os ímãs como indicada pela Figura 46, que é a disposição de um par de ímãs no rotor do acoplamento com essa configuração, resulta ainda nas seguintes relações:

$$y_{01} = -\frac{r}{\cos(\Phi)} \cdot \sin(\Psi + \Phi) + \frac{b}{2}$$

$$z_{01} = \frac{r}{\cos(\Phi)} \cdot \cos(\Psi + \Phi) - r_2$$

$$\Phi = \arctan\left(\frac{b}{2 \cdot r}\right)$$

$$\theta = \Psi$$

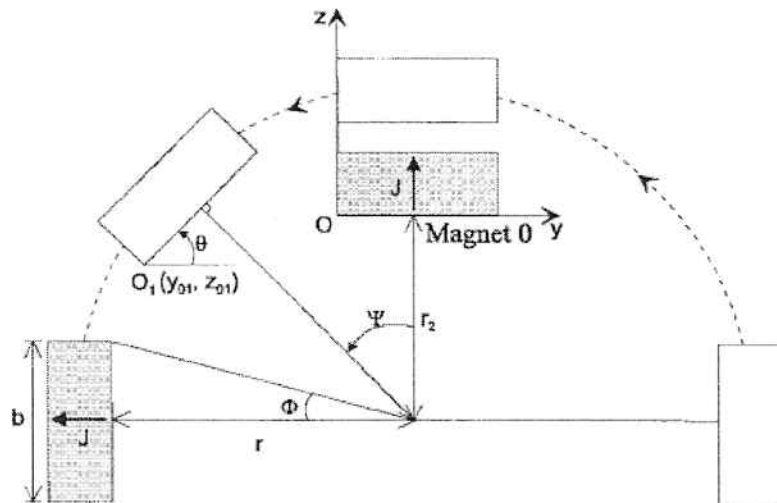


Figura 46 - Parâmetros para o cálculo radial

12.2. Anexo B – Programação em VBA

Utilizando-se a formulação descrita no Anexo A para o cálculo da componente tangencial da força entre os ímãs na configuração radial tem-se o seguinte código programado em VBA, baseado nas mesmas funções intermediárias aqui denominadas de *Myf1* a *Myf6*.

```
Function Myf5(y01 As Double, z01 As Double, theta As Double, b As Double, c As Double, zlinha As Double) As Double
```

```
Myf5 = -y01 * Sin(theta) + z01 * Cos(theta) + b * Sin(theta) - c * Cos(theta) + zlinha
```

```
End Function
```

```
Function Myf6(y01 As Double, z01 As Double, theta As Double, b As Double, c As Double, ylinha As Double) As Double
```

```
Myf6 = y01 * Cos(theta) + z01 * Sin(theta) - b * Cos(theta) - c * Sin(theta) + ylinha
```

```
End Function
```

```
Function Myf3(u As Double, y01 As Double, z01 As Double, theta As Double, b As Double, c As Double, ylinha As Double, zlinha As Double) As Double
```

```
Myf3 = Sqr(u ^ 2 + Myf5(y01, z01, theta, b, c, zlinha) * Myf5(y01, z01, theta, b, c, zlinha) + Myf6(y01, z01, theta, b, c, ylinha) * Myf6(y01, z01, theta, b, c, ylinha))
```

```
End Function
```

```
Function Myf4(u As Double, y01 As Double, z01 As Double, theta As Double, b As Double, c As Double, ylinha As Double, zlinha As Double) As Double
```

```
parcela1 = u * Myf6(y01, z01, theta, b, c, ylinha) * Log(-u + Myf3(u, y01, z01, theta, b, c, ylinha, zlinha)) - u * Myf6(y01, z01, theta, b, c, ylinha) - u * u * Log(Myf3(u, y01, z01, theta, b, c, ylinha, zlinha) + Myf6(y01, z01, theta, b, c, ylinha))
```

```
'parcela2 existe apenas para o calculo de parcela3.
```

```
parcela2 = (-Myf5(y01, z01, theta, b, c, zlinha) * Myf5(y01, z01, theta, b, c, zlinha) - u * u + u * Myf3(u, y01, z01, theta, b, c, ylinha, zlinha)) / (Myf5(y01, z01, theta, b, c, zlinha) * Myf6(y01, z01, theta, b, c, ylinha))
```

```
parcela3 = u * Myf5(y01, z01, theta, b, c, zlinha) * Atn(parcela2)
```

```
parcela4 = (u * worksheetFunction.Pi / 2) * (Sgn(Myf5(y01, z01, theta, b, c, zlinha)) * Myf5(y01, z01, theta, b, c, zlinha)) * Sgn(Myf6(y01, z01, theta, b, c, ylinha))
```

```
parcela5 = Myf6(y01, z01, theta, b, c, ylinha) * Myf3(u, y01, z01, theta, b, c, ylinha, zlinha) / 2
```

```
parcela6 = (u * u + Myf5(y01, z01, theta, b, c, zlinha) * Myf5(y01, z01, theta, b, c, zlinha)) * Log(Myf3(u, y01, z01, theta, b, c, ylinha, zlinha) + Myf6(y01, z01, theta, b, c, ylinha)) / 2
```

```
Myf4 = parcela1 + parcela3 + parcela4 + parcela5 + parcela6
```

```
End Function
```

```
Function Myf2(v As Double, w As Double, y01 As Double, z01 As Double, theta As Double, b
As Double, c As Double, blinha As Double, zlinha As Double) As Double
```

```
Myf2 = Myf4(w, y01, z01, theta, b, c, blinha, zlinha) - Myf4(v, y01, z01, theta, b, c,
blinha, zlinha) - Myf4(w, y01, z01, theta, b, c, 0, zlinha) + Myf4(v, y01, z01, theta,
b, c, 0, zlinha)
```

```
End Function
```

```
Function Myf1(v As Double, w As Double, y01 As Double, z01 As Double, theta As Double, b
As Double, c As Double, blinha As Double, clinha As Double, J As Double) As Double
```

```
Myf1 = (J * J * (Myf2(v, w, y01, z01, theta, b, c, blinha, clinha) - Myf2(v, w, y01,
z01, theta, b, c, blinha, 0))) / (16 * WorksheetFunction.Pi * WorksheetFunction.Pi * (10
^ -7))
```

```
End Function
```

```
Function Fy(theta As Double, x01 As Double, y01 As Double, z01 As Double, a As Double, b
As Double, c As Double, alinha As Double, blinha As Double, clinha As Double, J As
Double) As Double
```

```
Fy = -Myf1(x01, x01 + alinha, y01, z01, theta, 0, 0, blinha, clinha, J) + Myf1(x01 - a,
x01 - a + alinha, y01, z01, theta, 0, 0, blinha, clinha, J) _
```

```
- Myf1(x01 - a, x01 - a + alinha, y01, z01, theta, b, 0, blinha, clinha, J) + Myf1(x01,
x01 + alinha, y01, z01, theta, b, 0, blinha, clinha, J) _
```

```
- Myf1(x01 - a, x01 - a + alinha, y01, z01, theta, 0, c, blinha, clinha, J) + Myf1(x01,
x01 + alinha, y01, z01, theta, 0, c, blinha, clinha, J) _
```

```
- Myf1(x01, x01 + alinha, y01, z01, theta, b, c, blinha, clinha, J) + Myf1(x01 - a, x01
- a + alinha, y01, z01, theta, b, c, blinha, clinha, J)
```

```
End Function
```

12.3. Anexo C – Fórmulas para a configuração axial

Conforme mostrado por Eliès e Lemarquand (1999), a expressão da força tangencial (F_y) entre os ímãs é decorrente das Equações 1 e 2, sendo a primeira fórmula do campo magnético gerado por um ímã no espaço em um ponto M e a segunda, da força resultante devido a interação entre uma distribuição de cargas plana num campo externo.

$$\vec{B} = \int_{S_0} \frac{J}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\overrightarrow{M_S^+ M}}{M_S^+ M^3} dS_0 - \int_{S_{-0}} \frac{J}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\overrightarrow{M_S^- M}}{M_S^- M^3} dS_{-0} \quad (1)$$

$$\vec{F} = \int_{S_1} \frac{J}{\mu_0} \cdot \vec{B} \cdot dS_1 - \int_{S_{-1}} \frac{J}{\mu_0} \cdot \vec{B} \cdot dS_{-1} \quad (2)$$

Na equação (1), M_S^+ corresponde a um ponto na superfície de S_0 , enquanto M_S^- , a um ponto na superfície de S_{-0} e M, ao ponto no qual se deseja obter o campo magnético.

De posse da equação (2), a componente tangencial da força pode ser obtida, como mostra a Equação 3.

$$F_y = \frac{J}{\mu_0} \cdot \int_{x'=0}^{x'=a'} \int_{y'=0}^{y'=b'} [B_y(x, y, z_{01} + c', a, b, c, J) - B_y(x, y, z_{01}, a, b, c, J)] \cdot dy' dx' \quad (3)$$

As funções intermediárias utilizadas na equação (3) estão mostradas nas Equações (4) e (5), na qual (4) é a componente y do campo magnético em um ponto de coordenadas (x, y, z) devido a um ímã de dimensões a, b e c e magnetização J. Já a equação (5) é uma equação intermediária, apenas para facilitar a visualização.

$$B_y(x, y, z, a, b, c, J) = \frac{J}{4 \cdot \pi} \cdot \ln \left[\frac{N(x, y, z, a, b, c) \cdot N(x, y, z, 0, 0, c) \cdot N(x, y, z, a, 0, 0) \cdot N(x, y, z, 0, b, 0)}{N(x, y, z, a, 0, c) \cdot N(x, y, z, 0, b, c) \cdot N(x, y, z, a, b, 0) \cdot N(x, y, z, 0, 0, 0)} \right] \quad (4)$$

$$N(x, y, z, a, b, c) = a - x + \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2} \quad (5)$$

Além dessas Equações, também é possível parametrizar as coordenadas do sistema com o centro em O em função das coordenadas do outro sistema, como mostram as Equações (6) a (8).

$$x = x_{01} + x' \cdot \cos(\alpha) + y' \cdot \sin(\alpha) \quad (6)$$

$$y = y_{01} - x' \cdot \sin(\alpha) + y' \cdot \cos(\alpha) \quad (7)$$

$$z = z_{01} + z' \quad (8)$$

Dessa forma, é possível substituir as Equações (6) a (8) na Equação (3) para então efetuar uma integração numérica, já que até o presente momento não foi desenvolvida uma solução analítica para essa integração dupla.

12.4. Anexo D – Programação em Matlab

As funções e os scripts utilizados no Matlab para o cálculo numérico das expressões apresentadas no Anexo C são:

```
function z = MyN(mx, my, mz, a, b, c)
z = a - mx + sqrt((mx - a).^2+(my - b).^2+(mz- c).^2);

function z = MyBy(mx, my, mz, a, b, c, J)
z = (J./(4.*pi)).*log((MyN(mx, my, mz, a, b, c).*MyN(mx, my, mz, 0, 0,
c).*MyN(mx, my, mz, a, 0, 0).*MyN(mx, my, mz, 0, b, 0))./(MyN(mx, my,
mz, a, 0, c).*MyN(mx, my, mz, 0, b, c).*MyN(mx, my, mz, a, b,
0).*MyN(mx, my, mz, 0, 0, 0)));

function z = Fy(alpha, x01, y01, z01, a, b, c, alinh, blin, clin,
J)
z = (J./(4.*pi.*(10.^-
7))).*dblquad(@(x,y)MyBy(x01+x.*cos(alpha)+y.*sin(alpha), y01-
x.*sin(alpha)+y.*cos(alpha), z01+clin, a, b, c, J)-
MyBy(x01+x.*cos(alpha)+y.*sin(alpha), y01-x.*sin(alpha)+y.*cos(alpha),
z01, a, b, c, J),0, alinh, 0, blin, 10.^-6, @quadl);
```

- Script para o cálculo da força tangencial em função do ângulo de rotação:

```
% Cálculo da força tangencial em função do ângulo de rotação
% Parametros do prototipo

Dima = 0.015;
eima = 0.005;
p = 7;
e = 0.002;

% Parametros para obtencao de dados

StepDeg = 0.1;           %passo entre os pontos calculados
AmpDeg = 90;            %Amplitude do angulo de varredura

% Calculo dos parametros dependentes

l = Dima*sqrt(pi/4);
d = eima*2;
r1 = Dima/(2*sin(pi/(3*p)));
R = r1 - l/2;

%Calculo da força

RotationAngleDegrees = -AmpDeg:StepDeg:AmpDeg;
phi = Calcphi(l,R);
Y = [];
for k = -AmpDeg*pi/180:StepDeg*pi/180:AmpDeg*pi/180
    x01 = Calcx01(k, phi, R);
```

```

    y01 = Calcy01(k, phi, l);
    z01 = Calcz01(d, e);
    Y = [Y; Fy(k, x01, y01, z01, l, l, l, l, l, l, 1)];
end
plot(RotationAngleDegrees, Y)
grid on
xlabel('Rotation Angle (Degrees)'); ylabel('Tangential Force (N)');

```

- Script para o cálculo do torque em função do ângulo de rotação:

```

% Cálculo do torque em função do ângulo de rotação
% Parametros do prototipo

Dima = 0.015;
eima = 0.005;
J = 1.2;
p = 8;
e = 0.002;
RDP = 0.7;          % Relação Dima pelo Passo Polar

% Parametros para obtencao de dados

StepDeg = 1;          % Passo entre os pontos calculados
AmpDeg = 180;        % Amplitude do angulo de varredura

% Calculo dos parametros dependentes

l = Dima*sqrt(pi/4);
d = eima*2;
r1 = Dima/(2*sin(RDP*pi/(2*p)));
R = r1 - l/2;
phi = Calcphi(l,R);
RotationAngleDegrees = -AmpDeg:StepDeg:AmpDeg;

Torque = [];
for RotAng = -AmpDeg*pi/180:StepDeg*pi/180:AmpDeg*pi/180

    FyTot = 0;
    for k = 0:1:2*p-1
        alphai = RotAng+k*pi/p;
        x01i = ((cos(RotAng+phi+k*pi/p)/cos(phi))-1)*R;
        y01i = (1-(sin(RotAng+phi+k*pi/p)/sin(phi)))*l/2;
        z01i = d+e;
        FyTot = FyTot+(-1)^k*Fy(alphai, x01i, y01i, z01i, l, l, d, l,
l, d, J);
    end

    Torquei = FyTot*r1*2*p;
    Torque = [Torque;Torquei];
end
plot(RotationAngleDegrees, Torque)
grid on
xlabel('Rotation Angle (Degrees)'); ylabel('Torque (N.m)');

```

12.5. Anexo E – Dimensionamento do rotor

A formulação para o dimensionamento do rotor está ilustrada na Figura 47.

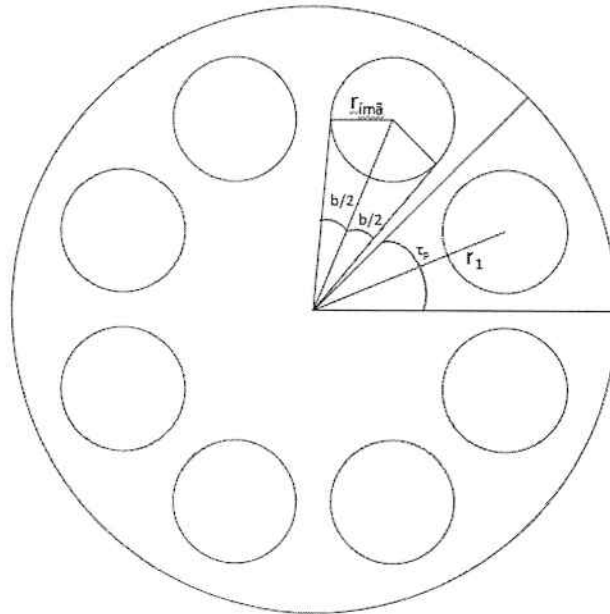


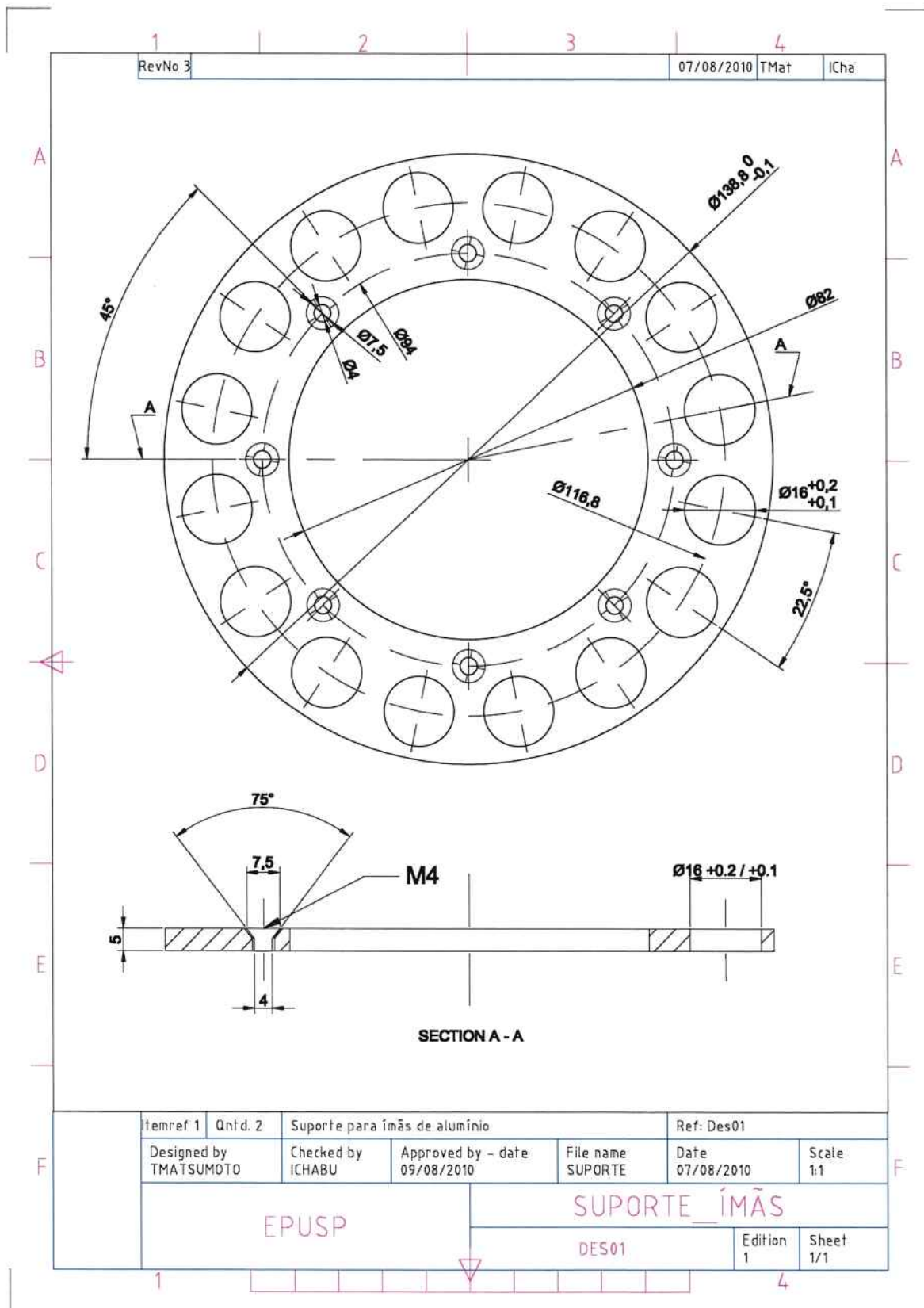
Figura 47 - Dimensionamento do rotor

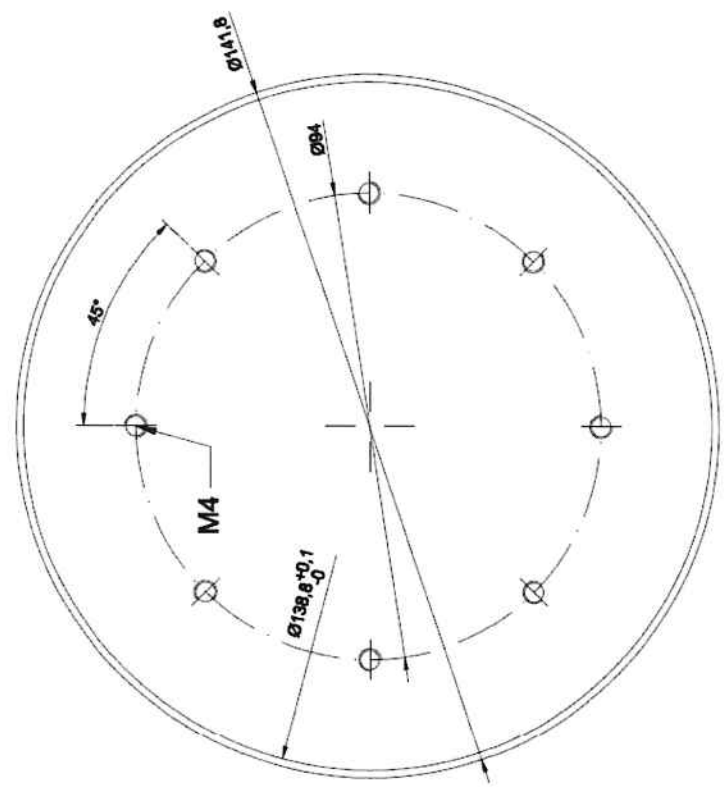
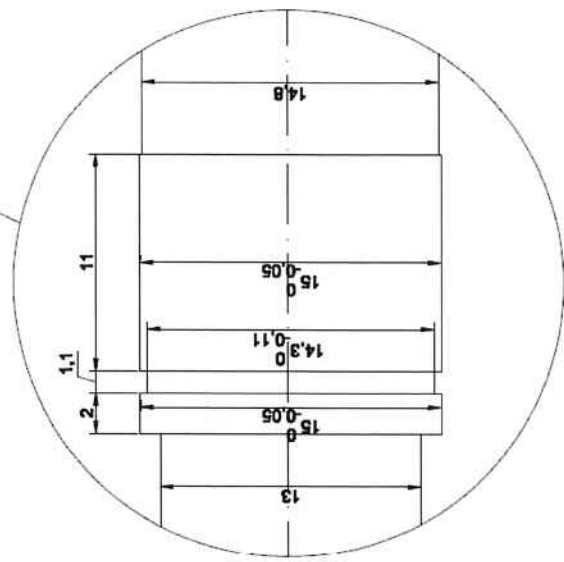
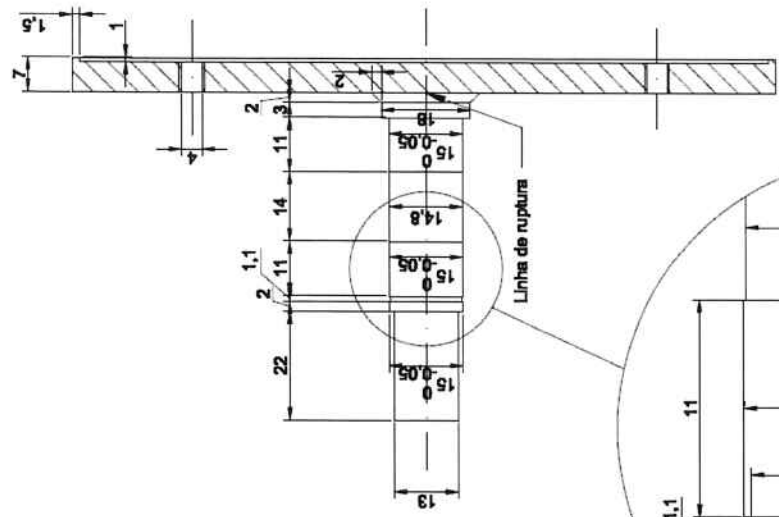
$$RDP = \frac{b}{\tau_p} \Rightarrow b = RDP \cdot \frac{\pi}{p}$$

$$\sin\left(\frac{b}{2}\right) = \frac{D_{imã}/2}{r_1} \Rightarrow \sin\left(\frac{RDP \cdot \pi}{2 \cdot p}\right) = \frac{D_{imã}}{2 \cdot r_1}$$

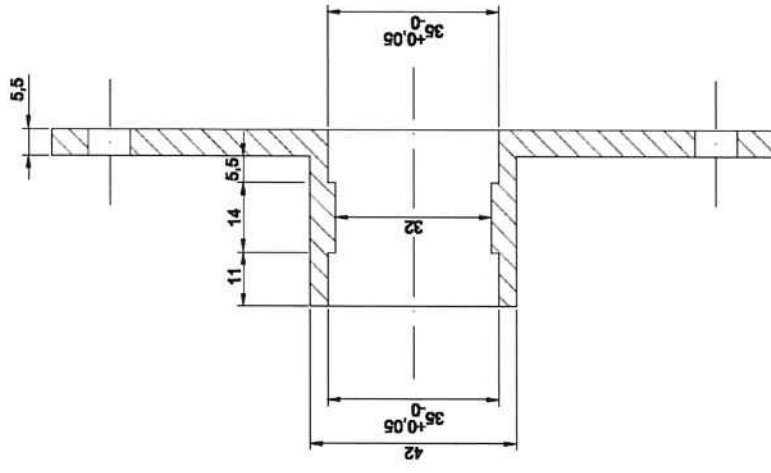
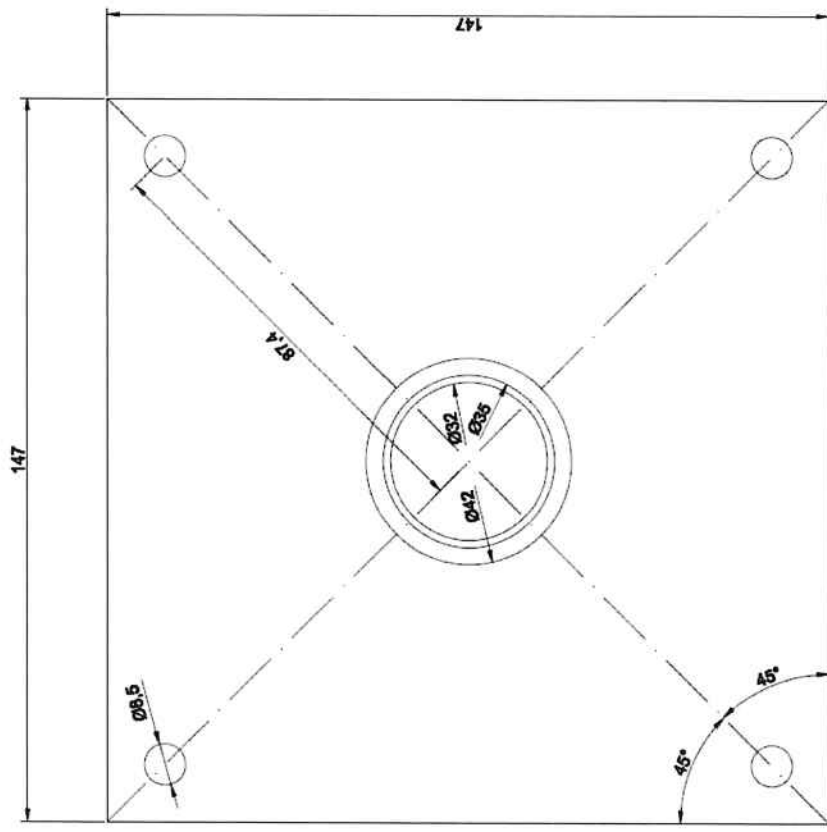
$$r_1 = \frac{D_{imã}}{2 \cdot \sin\left(\frac{RDP \cdot \pi}{2 \cdot p}\right)}$$

12.6. Anexo F – Desenhos de execução

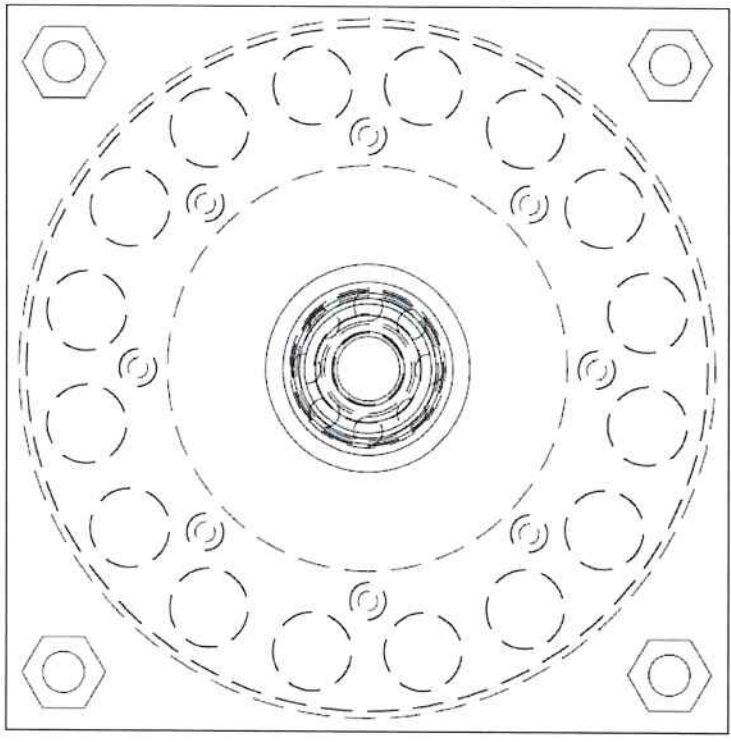
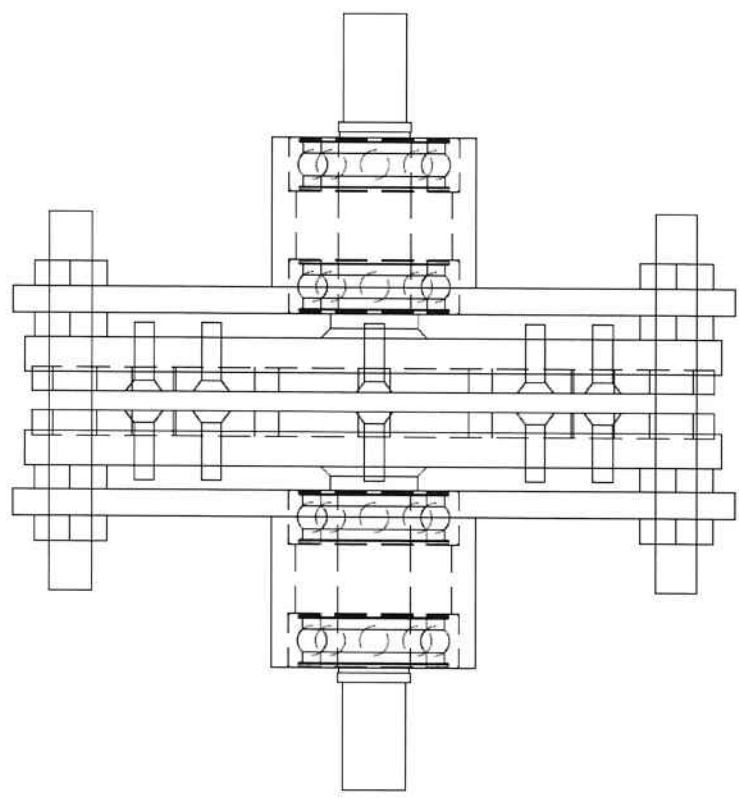




Itemref 2	Dntd. 2	Rotor de aço do acoplamento magnético	Reference: Des02
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date
TMA TSUMOTO	ICHABU	09/08/2010	07/08/2010
EPUSP		File name	Scale
		ROTOR	1:1
		ROTOR	
		Edition	Sheet
		1	1/1

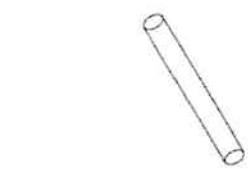
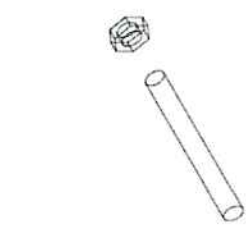
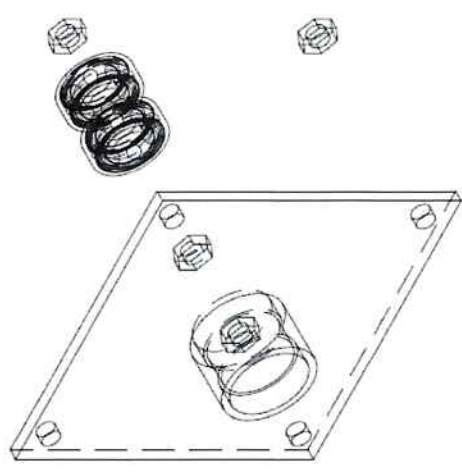
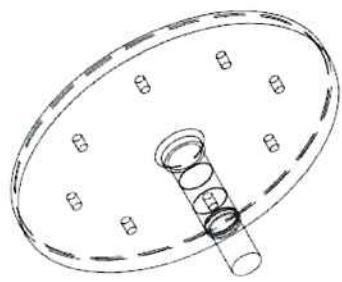
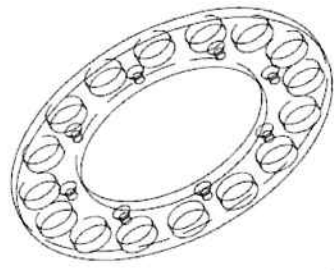


Itemref: 3	Onid. 2	Apoio de aluminio para o rofor do acoplamento magnético			Reference: Des03
Designed by TMATSUMOTO	Checked by ICHABU	Approved by - date 11/08/2010	File name APOIO	Date 09/08/2010	Scale 1:1
EPUSP			APOIO		
			DES03	1	8
			Edition	Sheet	



Itemref 4	Dntd. 1	Acoplamento magnético montado	Reference: Des04
Designed by TATSUMOTO	Checked by ICHABU	Approved by - date 13/08/2010	Date 13/08/2010
		File name ACOMAG	Scale 1:1
EPUSP		ACOPLAMENTO_MAGNETICO	Edition 1
		DES04	Sheet 1/1

RevNo 1



Itemref 5	Dtnd. 1	Vista explodida do acoplamento magnético	Reference: Des05
Designed by TMA TSUMOTO	Checked by ICHABU	Approved by - date 13/08/2010	Date 13/08/2010
		File name ACOMAG_EXP	Scale 1:1
EPUSP		ACOPLAMENTO_MAGNETICO	
		DES05	Edition 1
			Sheet 1/1