



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – CTG  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECANICA

***ESTUDO ANALÍTICO/EXPERIMENTAL DE UM PROTÓTIPO DE  
ROTOR MAGNETO***

Roberto de Araújo Alécio

Recife - PE,  
Mar/2011

***ESTUDO ANALÍTICO/EXPERIMENTAL DE UM PROTÓTIPO DE  
ROTOR MAGNETO***

ROBERTO DE ARAÚJO ALÉCIO

Dissertação para apresentação ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como requisito para obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica, orientada pelo Prof. Dr. Alex Maurício Araújo e Co-orientada pelo Prof. Dr. Tiago Leite Rolim.

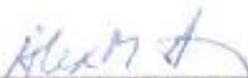
UFPE/Recife-PE  
roberto.alecio@ufpe.br  
Mar/2011

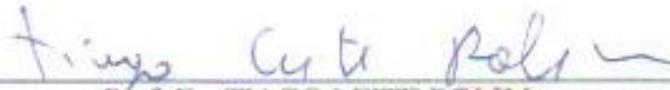
**“ESTUDO ANALÍTICO/EXPERIMENTAL DE UM PROTÓTIPO DE ROTOR MAGNETO”**

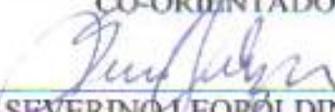
ROBERTO DE ARAÚJO ALÉCIO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

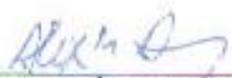
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

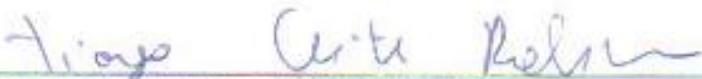
  
Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO  
ORIENTADOR/PRESIDENTE

  
Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM  
CO-ORIENTADOR

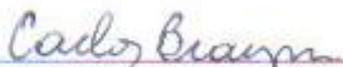
  
Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO  
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO (UFPE)

  
Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM (UFPE)

  
Prof. Dr. CÉZAR HENRIQUE GONZALEZ (UFPE)

  
Prof. Dr. CARLOS ALBERTO BRAYNER DE OLIVEIRA LIRA (DEN/UFPE)

Catálogo na fonte

Bibliotecária Raquel Cortizo, CRB-4 664

A366e Alécio, Roberto de Araújo.

Estudo analítico/experimental de um protótipo de rotor magneto / Roberto de Araújo Alécio. - Recife: O Autor, 2011.

xxi, 961 folhas, il., gráfs., tabs., figs.

Orientador: Prof. Dr: Alex Maurício Araújo

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2011.

Inclui Referências Bibliográficas e Anexos.

## AGRADECIMENTOS

Relembrando as pessoas que contribuíram com a construção deste trabalho, tenho o prazer e obrigação de agradecer, consciente da importância que tiveram neste caminhar acadêmico onde, de alguma forma obtive importante auxílio para que o sucesso neste trabalho fosse alcançado.

Inicialmente agradeço a meus orientadores: Alex Maurício Araújo e Tiago Leite Rolim, pela confiança na condição de pesquisador em mim depositada e principalmente pela excelente orientação, proporcionando uma fundamental contribuição à realização deste trabalho.

Cabe-me agradecer aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, que com presteza e dedicação fizeram de suas aulas uma verdadeira forma de incentivo as pesquisas em elaboração, com o intuito de formar profissionais de grande capacidade: Carlos Augusto dos Santos, César Henrique Gonzales, Darlan Karlo Carvalho, Jorge Recarte Henriquez Guerrero, Maurílio José dos Santos, Oscar Olímpio de Araújo, Paulo Roberto Maciel Lira, Rita de Cassia Fernandes, Yogendra Prasad Yadava, e todos os demais professores da coordenação do curso de Engenharia Mecânica representado pelo coordenador do Programa de Pós Graduação, Prof. Severino Urtiga Filho e agradecendo também a Sra. Eliane, representando aqui todos os funcionários deste Programa.

Agradeço aos amigos que colaboraram neste trabalho, quando necessitei de auxílio técnico: Prof. do IFPE, Luiz Abelardo Freire, Profs. do IFAL, Paulo dos Santos Silva, Manoel Messias da Silva, Jackson Souto de Moraes, Jorge Luis Lauriano Gama e aos amigos José Holanda, Valdson Correia Ferreira (Braskem), com importante contribuição na elaboração deste trabalho, extensivo a todos os servidores do IFAL, principalmente aos da Coordenação do Curso de Mecânica/IFAL representado pelo Coordenador do Curso Prof.

Marcus Alexandre Buarque, como também as contribuições dos professores do Curso de Eletrônica/IFAL: João Henrique Cardoso, Rômulo Pires, George Chaves e Valmir Moreti.

Não podendo esquecer aos amigos do Curso de Pós Graduação, que também tiveram sua contribuição, em momentos de estudos e tarefas acadêmicas, destacando entre eles: Tulio Oliveira, Bonifácio Marinheiro, Oyama Douglas Queiroz, José Carlos Oliveira, Ana Lúcia Braga Mineiro, Maria Antonieta Oliveira, José Manoel de Souza, Rafael Luz Espindola e Gilberto Martins de Melo, pelas horas de estudo que passamos buscando a aquisição de conhecimentos técnicos científicos, como também colegas da graduação que em momentos informais discutimos sobre o assunto dando também sua contribuição, Aigbokhan Isaiah Asibor, Heles Pereira da Silva, Marília Gabriela Lourenço da Silva e Naevio Mendonça Resende Neto.

Dedico especialmente um agradecimento a minha esposa Luciana Leite Alécio, pela paciência e compreensão que teve nas horas que dela precisei, principalmente pela dedicação ao nosso filho Roberto Torres Leite Alécio nos momentos que afastado estive.

Com grande admiração, devo agradecer aos meus pais José Torres Alécio e Maria Áurea Alécio, sempre persistindo no caminho de uma elevação em minha formação acadêmica e pessoal, exemplificado pelas suas atitudes de comportamento, encaminhando para melhor condição de vida futura, agradecendo também aos irmãos que, do mesmo modo, tiveram grande influência em minha formação.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas (IFAL), pela oportunidade concedida em participar desta qualificação, tendo a certeza que resultará em grande valia para um melhor atendimento ao público que do instituto necessitar.

Finalmente, agradeço a Fundação Alagoana de Amparo a Pesquisa (FAPEAL), pela confiança em meu projeto de pesquisa, avaliando-o positivamente, de onde obtive uma bolsa de mestrado.

A todos, meu sincero obrigado!

## RESUMO

Este trabalho objetiva apresentar o desenvolvimento e os resultados do estudo analítico e experimental das energias e forças resultantes em um protótipo de um rotor magneto, desenvolvido experimentalmente. Este rotor tem como princípio de ação motora, as forças de repulsão do campo magnético causadas pelo posicionamento dinâmico de ímãs permanentes entre o injetor e o rotor do protótipo.

Para este estudo, uma análise global de energia do sistema foi idealizada com base na primeira lei da termodinâmica e uma análise local baseada no cálculo do torque instantâneo em posições estratégicas do movimento do rotor, foi desenvolvida mecanicamente, para verificação analítica da evolução dinâmica das forças magnéticas motrizes. A modelagem das forças magnéticas resistivas, potencialmente atuantes no sistema, foi desenvolvida e analisada através do software MAXWELL®. Para identificação das forças resistivas mecânicas foi concebido um teste experimental utilizando-se o protótipo e um dinamômetro para obtenção do módulo destas forças, dando aos resultados obtidos o tratamento estatístico adequado ao caso.

Para o desenvolvimento experimental dos modelos, utilizou-se o software AutoCAD®, que se constituiu em uma ferramenta fundamental na tarefa de transformar concepções em modelos geométricos, modelos físicos e, finalmente, em um protótipo. Esta ferramenta também serviu para identificar as direções das forças nas posições do movimento do rotor para fins de análise mecânica nos cálculos do estudo desenvolvido.

Os resultados obtidos através dos estudos analíticos e testes experimentais permitem visualizar uma tendência de que o protótipo em estudo ficaria estacionário, pois, do confronto entre as resultantes das forças motrizes e resistivas, identificou-se semelhança entre suas magnitudes. Este fato faria com que a energia inicialmente aplicada por um

agente externo fosse progressivamente dissipada pelas resistências do sistema, causando sua parada.

Palavra-chave: Motor magneto; Imã permanente; Campo magnético.

## ABSTRACT

This work presents the development and results of an analytical and experimental study with respect to the energies and the resultant forces in a prototype of a rotor magnet, developed experimentally. The principles responsible for the rotor movement are magnetic field repulsion forces, caused by dynamic positioning of permanent magnets between the rotor and nozzle prototype.

For this study, a comprehensive analysis of the energy system was designed based on the first law of thermodynamics where a local analysis based on calculating the instantaneous torque in strategic positions of the rotor movement was developed mechanically for the analytical verification of the dynamic evolution of magnetic driving forces. The modeling of the magnetic resistive forces, potentially active in the system, was developed and analyzed using the software Maxwell ®.

An experimental test using a dynamometer and the prototype for obtaining the module of these forces was carried out in order to identify the mechanical resistive forces, where the appropriate statistical treatment were applied to the obtained results.

The AutoCAD ® software was adopted for the experimental development of the models since it is used for transforming conceptions into geometrical models, physical models and finally into a prototype. This tool was also used for identifying the directions of the forces in the rotor movement positions in order to carry out mechanical analysis in the calculations of the developed study.

The tendency of the prototype under study to remain stationary can be seen through the results obtained from analytical studies and experimental tests, therefore, due to confrontation between the resultants of the driving and resistive forces, similarities were identified between their magnitudes. This fact would make the energy initially applied by an

external agent to be dissipated gradually by the resistances of the system, thereby causing it to stop.

Keywords: motor magnet, permanent magnet, magnetic field.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Linhas de força de campo magnético ao redor de uma barra Magnética. Fonte: Materials Science and Engineering, (CALLISTER, 2007).

Figura 2.2 – Linhas de campo magnético, ( $H_{Ext}$ ) atravessando um material ferromagnético.

Figura 2.3 - Representação esquemática da densidade de fluxo B versus força do campo magnético H para materiais diamagnéticos, paramagnéticos. Fonte: Materials Science and Engineering, (CALLISTER, 2007).

Figura 2.4 – Configuração do dipolo atômico – material paramagnético. Fonte: Materials Science and Engineering, (CALLISTER, 2007)

Figura 2.5 – Configuração do dipolo atômico – material diamagnético. Fonte: Materials Science and Engineering (CALLISTER, 2007)

Figura 2.6 - Em (a), domínios magnéticos e respectivas orientações da magnetização. Em (b), domínios magnéticos se orientando com o campo externo aplicado.

Figura 2.7 - (a) domínios magnéticos desalinhados, (b), (c) e (d) se alinhando com o campo externo.

Figura 2.8 - Curva de magnetização de um material magnético.

Figura 2.9 - Ciclo de histerese. Fonte: Materials Science and Engineering (CALLISTER, 2007)

Figura 2.10 - Materiais magneticamente duros e moles. Fonte: Materials Science and Engineering (CALLISTER, 2007)

Figura 2.11 - Motor magnético de Howard Johnson. Patente (USPTO – 4.151.431). Fonte: Revista Ciência e Mecânica edição de primavera 1980.

Figura 2.12 – Rotor e estator do motor magnético de Johnson. Fonte: Revista Ciência e Mecânica edição de primavera 1980.

Figura 2.13 – Armadura (rotor) com movimento da direita para a esquerda. Fonte: Revista Ciência e Mecânica edição de primavera 1980.

Figura 2.14 – Patente de Mauro Malafaia (INPI - PI8900294 A). Fonte: Base de patentes do INPI.

Figura 2.15 – Patente de Antônio Gonçalves (INPI - PI0704805 A). Fonte: Base de patentes do INPI.

Figura 2.16 – Patente de Antônio Gonçalves (INPI - PI0704805 A). Fonte: Base de patentes do INPI.

Figura 2.17 - Modificação do Motor Magnético por Robert H Calloway. Fonte: [http://pesn.com/2010/07/31/9501681\\_Revealing\\_What\\_I\\_Know\\_About\\_Building\\_the\\_Pereudev\\_Magnet\\_Motor/Blueprints/index.html](http://pesn.com/2010/07/31/9501681_Revealing_What_I_Know_About_Building_the_Pereudev_Magnet_Motor/Blueprints/index.html), acesso em 17/12/2010.

Figura 2.18 – Representação dos ímãs do rotor/estator da modificação de Calloway. Fonte: [http://pesn.com/2010/07/31/9501681\\_Revealing\\_What\\_I\\_Know\\_About\\_Building\\_the\\_Pereudev\\_Magnet\\_Motor/Blueprints/index.html](http://pesn.com/2010/07/31/9501681_Revealing_What_I_Know_About_Building_the_Pereudev_Magnet_Motor/Blueprints/index.html), acesso em 17/12/2010.

Figura 2.19 - Motor magnético do tipo Perendev, por Felipe Lopes. Fonte: [http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem2\\_2007/FelipeR-Campoy\\_RF.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2007/FelipeR-Campoy_RF.pdf).

Figura 3.1 – Geometria e dimensões do ímã utilizado no experimento.

Figura 3.2 – Detalhe de fixação do ímã plataforma da balança.

Figura 3.3 – Detalhe de fixação do ímã na extremidade da haste.

Figura 3.4 - Ímãs posicionados com polos iguais frente a frente, para a condição de repulsão.

Figura 3.5 – Gráfico da força magnética x distância entre ímãs.

Figura 3.6 - Gráfico mostrando separadamente os valores adquiridos no experimento relacionando o entreferro e a força com a ordem da amostra.

Figura 3.7 - Gráfico da curva Força x Gap.

Figura 3.8 – Exemplo do movimento do fluxo magnético. Ima com isolante, software Maxwell®.

Figura 3.9 – Analisador portátil XRF da I NOVAC. Fonte: Valdson Ferreira, 2010.

Figura 3.10 - Analisador portátil XRF. Equipamento de ensaio para detectar o material da liga observada. Fonte: Valdson Ferreira, 2010.

Figura 4.1 – Desenho mostrando o primeiro modelo desenvolvido, Software SolidWorks®.

Figura 4.2 – Ação manual para movimentar o rotor, Software SolidWorks®.

Figura 4.3 – Desenho do segundo modelo, Software SolidWorks®.

Figura 4.4 – Desenho esquemático do terceiro modelo, Software SolidWorks®.

Figura 4.5 – Vista superior do terceiro modelo, Software SolidWorks®.

Figura 4.6 Esquema da concepção do quinto modelo, Software SolidWorks®.

Figura 4.7 – Protótipo Final.

Figura 4.8 – Detalhe do conjunto injetor e sua interação com o rotor.

Figura 5.1 – Modelagem do sistema para análise pela primeira lei da termodinâmica na partida.

Figura 5.2 – Modelagem do sistema para análise pela primeira lei da termodinâmica após a partida.

Figura 5.3 - Análise de forças magnéticas envolvidas no rotor.

Figura 5.4 – Esquema instantâneo da análise da decomposição de forças em (a)Fn1 e (b)Fn2.

Figura 5.5 – Esquema da geometria do rotor.

Figura 5.6 – Esquema das configurações que se repetem no ciclo de 40 graus.

Figura 5.7 – Primeira posição para cálculo de torque resultante

Figura 5.8 – Segunda posição para cálculo do torque resultante

Figura 5.9 – Terceira posição para cálculo do torque resultante

Figura 5.10 – Quarta posição para cálculo do torque resultante

Figura 5.11 – Detalhe do efeito da blindagem na magnitude das forças resistivas. (Legenda na tabela 4.1).

Figura 5.12 – Força magnética repulsiva na posição 01 e respectiva simulação, Software Maxwell®.

Figura 5.13 - Força magnética repulsiva na posição 02 e respectiva simulação, Software Maxwell®.

Figura 5.14 - Força magnética repulsiva na posição 03 e respectiva simulação, Software Maxwell®.

Figura 5.15 - Força magnética repulsiva na posição 04 e respectiva simulação, Software Maxwell®.

Figura 5.16 – Dinamômetro modelo MAEY utilizado no experimento.

Figura 5.17 – Representação do processo de medição com dinamômetro.

Figura 5.18 - Esquema de medição da resistência mecânica com dinamômetro.

Figura 5.19 – Representação gráfica da relação de força e torque resistivo no rotor

Figura 5.20 – Posicionamento e dimensões do arranjo de imas no protótipo.

Figura 5.21 – Posições e valores das forças magnéticas motoras.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Resultados experimentais para Gap x Massa.

Tabela 3.2 – Resultados experimentais para Gap x Força.

Tabela 3.3 – Resultados exemplo da amostra corrigida.

Tabela 3.4 – Resultado descrito no analisador portátil.

Tabela 5.1 – Representação usada na figura 6.3.

Tabela 5.2 – Representação dos valores em cada instante calculado: força resultante, ângulos e distâncias.

Tabela 5.3 - Força experimental e Torque resistivo no rotor.

## LISTA DE EQUAÇÕES

2.1. Densidade do fluxo magnético  $B = \mu \cdot H$ ,  $\frac{Wb}{A \cdot m}$ .

2.2. Densidade do fluxo magnético no vácuo  $B_0 = \mu_0 \cdot H$ ,  $\frac{Wb}{A \cdot m}$ .

2.3. Permeabilidade relativa  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ , Adimensional.

2.4. Módulo da força aplicada em cada polo  $F = B \cdot p$ , (N).

2.5. Força entre dois polos magnéticos  $F = k \frac{pp'}{r^2}$ , (N).

2.6. Valor da força de  $pp'$  entre dois polos magnéticos  $pp' = \frac{F \cdot r^2}{k}$ , ( $A^2 \cdot m^2$ ).

2.7. Quando  $p = p'$  o valor da intensidade do polo é  $p = \sqrt{\frac{F \cdot r^2}{k}}$ , (A.m).

3.1. Força experimental entre os dois polos magnéticos  $F = \frac{0,0004}{r^{1,814}}$ , (N).

3.2. Constante experimental da função  $kpp' = 0,0004$ , (N.m<sup>2</sup>).

5.1. Primeira lei da termodinâmica  $\delta Q - \delta W = dE$ .

5.2. Equação escrita em forma de taxa  $\dot{Q} - \dot{W} = \left. \frac{dE}{dt} \right)_{SISTEMA}$ .

5.3. Energia total do sistema:  $E_{sistema} = \int_{M(SISTEMA)} e dm = \int_{\forall(SISTEMA)} e \rho dV$ .

5.4. Energia intensiva do sistema:  $e = u + \frac{V^2}{2} + gz$ .

5.5. Variação de Energia e variação de tempo:  $\left( \frac{\Delta E}{\Delta t} = -\frac{W}{\Delta t} = -\dot{W}_{Saída} \right)$ .

5.6. Torque resultante instantâneo:  $\tau_{res} = \sum \tau = \tau_{11} + \tau_{12} + \tau_{21} + \tau_{22}$ .

5.7 – Equação 5.5, aplicada a força entre dois polos magnéticos:

$$\tau_{res} = F_{n1}d(\text{sen}\theta_1 \cdot \cos\beta_1 + \cos\theta_1 \cdot \text{sen}\beta_1) + F_{n2}d(\text{sen}\theta_2 \cdot \cos\beta_2 + \cos\theta_2 \cdot \text{sen}\beta_2).$$

5.8 – Torque resultante:

$$\tau_{res} = kpp'.d \left[ \frac{1}{r_1^2} (\text{sen}\theta_1 \cdot \cos\beta_1 + \cos\theta_1 \cdot \text{sen}\beta_1) + \frac{1}{r_2^2} (\text{sen}\theta_2 \cdot \cos\beta_2 + \cos\theta_2 \cdot \text{sen}\beta_2) \right].$$

## TERMINOLOGIA

**Curva de Histerese:** Representação gráfica da relação entre força magnética e a magnetização induzida resultante de um material ferromagnético.

**Desmagnetização:** A redução parcial ou completa da indução residual de um ímã ou um dispositivo magnético.

**Diamagnéticos:** quando sua permeabilidade for próxima de 1, sendo  $< 1$ , como por exemplo, cobalto.

**Domínios Magnéticos:** Os dipolos magnéticos unitários de tamanho molecular, os quais definem as características magnéticas de um ímã.

**Ferromagnético:** A permeabilidade desse material é  $\gg 1$ . Exemplo: ferro, aço, aço silício.

**Fluxo magnético (B):** Manifestação física de um material quando submetido a influencias da magnetização.

**Força Coercitiva ( $F_c$ ):** É a força necessária para um ímã ser desmagnetizado. É usado ainda para calcular a força necessária para a magnetização. Um material de alta coercitividade é mais difícil de ser magnetizado do que um de baixa coercitividade.

**Força Coercitiva Intrínseca ( $H_{cl}$ ):** É a intensidade de força desmagnetizante necessária para reduzir a remanência de um ímã a zero. Esse fator é utilizado para a determinação da força necessária para a desmagnetização de ímãs orientados ou de terras raras (Sm-Co, Nd-Fe-B).

**Força desmagnetizante:** É a intensidade de campo magnético H aplicada na polaridade oposta da força magnetizante usada para magnetizar um ímã.

**Gap:** Porção do circuito magnético que não contém material ferromagnético.

**Indução Magnética (B):** O campo magnético gerado em um ímã ou em um material ferromagnético quando uma força magnetizante (H) for-lhes aplicada. O valor obtido depende da permeabilidade do material e do nível de campo aplicado.

**Indução Residual ( $B_r$ ):** A indução magnética remanescente em um material após a força magnetizante ter sido removida, mas com o ímã em um circuito fechado sem gap de ar ou entreferro e nenhuma força desmagnetizante exercida sobre o material.

**Material Anisotrópico:** Material magnético com um eixo de magnetização preferencial, também conhecido por material orientado. A anisotropia é obtida durante o processo de fabricação, pela orientação magnética da estrutura cristalina do material. Estes materiais devem ser magnetizados ao longo do eixo preferencial.

**Material Isotrópico:** Material magnético que aceita magnetização em qualquer direção, também conhecido por material não orientado.

**Paramagnético:** quando sua permeabilidade for próxima de 1, sendo  $> 1$ . Exemplo: latão, cobre, estanho, madeira, papel, plásticos, alumínio.

**Permeabilidade ( $\mu$ ):** Habilidade da indução magnética atravessar um material.

**Produto de energia ( $B_{hm\acute{a}x}$ ):** Ponto da curva de desmagnetização no qual o produto da indução magnética pelo campo desmagnetizante atinge o máximo valor.

**Relutância:** É a oposição oferecida ao campo magnético em um circuito magnético, similar à resistência em um circuito elétrico. Um circuito de baixa relutância como ferro ou aço, pode conduzir um campo magnético com facilidade, enquanto que uma alta relutância, como o ar, apresenta um alto grau de resistência no caminho magnético.

**Remanência:** O campo magnético remanescente em um circuito magnético após a força magnetizante ter sido removida.

**Saturação:** Um material magnético está saturado quando um aumento de força de magnetização aplicada não resulta no aumento da indução magnética.

**Tratamento Magnético:** O ato de reduzir a indução magnética residual de tal forma que uma densidade de fluxo desejada seja atingida em um gap ou entreferro, também conhecido como estabilização magnética.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>v</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xv</b>
<b>LISTA DE EQUAÇÕES</b> .....	<b>xvi</b>
<b>TERMINOLOGIA</b> .....	<b>xviii</b>
<b>Sumário</b> .....	<b>xx</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>22</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>26</b>
<b>2. Revisão bibliográfica</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1. Magnetismo</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1.1. Introdução</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1.2. Magnetismo nos materiais</b> .....	<b>30</b>
<b>2.1.3. Domínio magnético</b> .....	<b>32</b>
<b>2.1.4. Força entre dois polos magnéticos</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2. Patentes</b> .....	<b>37</b>
<b>2.3. Softwares utilizados</b> .....	<b>44</b>
<b>2.3.1. AutoCAD®</b> .....	<b>44</b>
<b>2.3.2. SolidWorks®</b> .....	<b>44</b>
<b>2.3.3. Maxwell®</b> .....	<b>45</b>
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>46</b>
<b>3. Testes experimentais</b> .....	<b>46</b>

<b>3.1. Força dos ímãs .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.1. Introdução.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.2. Local e materiais usados .....</b>	<b>47</b>
<b>3.1.3. Metodologia.....</b>	<b>47</b>
<b>3.1.4. Valores amostrais .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1.5. Análise dos resultados .....</b>	<b>50</b>
<b>3.2. Material isolante.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.1. Metodologia e equipamento.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.2. Resultado e características.....</b>	<b>55</b>
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>57</b>
<b>4. Desenvolvimento do protótipo.....</b>	<b>57</b>
<b>4.1. Primeiro modelo.....</b>	<b>57</b>
<b>4.2. Segundo modelo .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3. Terceiro modelo .....</b>	<b>60</b>
<b>4.4. Quarto modelo.....</b>	<b>62</b>
<b>4.5. Protótipo final.....</b>	<b>63</b>
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>66</b>
<b>5. Análises Mecânicas.....</b>	<b>66</b>
<b>5.1. Análise Global.....</b>	<b>66</b>
<b>5.1.1. Lei da Conservação da Energia.....</b>	<b>66</b>
<b>5.2. Análise Local .....</b>	<b>69</b>
<b>5.2.1. Modelagem das forças magnéticas motoras .....</b>	<b>69</b>
<b>5.2.2. Cálculo das forças magnéticas motoras.....</b>	<b>73</b>
<b>5.2.2.1. Simulação da posição 1. ....</b>	<b>73</b>
<b>5.2.2.2. Simulação da posição 2. ....</b>	<b>75</b>
<b>5.2.2.3. Simulação da posição 3. ....</b>	<b>76</b>
<b>5.2.2.4. Simulação da posição 4. ....</b>	<b>77</b>
<b>5.2.2.5. Análise dos Resultados .....</b>	<b>78</b>
<b>5.2.3. Evolução das forças magnéticas resistivas.....</b>	<b>78</b>
<b>5.2.3.1. Análise dos Resultados .....</b>	<b>81</b>

<b>5.2.4. Identificação da força de resistência mecânica. ....</b>	<b>81</b>
<b>5.2.4.1. Metodologia experimental. ....</b>	<b>81</b>
<b>5.2.5. Análise mecânica local do balanço de forças ....</b>	<b>83</b>
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>86</b>
<b>6. Conclusões e Recomendações .....</b>	<b>86</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>93</b>

# CAPÍTULO 1

## *1. Introdução*

O estudo de processos da geração de energia através de fontes renováveis tem sido alvo de grande preocupação entre os pesquisadores que atuam nesta área. Sua intenção final é a de substituição dos métodos de geração de energia convencional por escolhas energéticas que priorizem a manutenção do sistema ecológico.

Essa condição reforça a questão do estudo de alternativas das fontes de energia autônoma, em que se é capaz de gerar energia sem depender de fontes primárias convencionais, tendo seu maior emprego nas localidades mais afastadas dos centros urbanos. Turrini (1993, p. 10) enfatiza que

são exatamente estas escolhas energéticas em nível industrial a influir profundamente sobre o sistema ecológico do nosso planeta que podem levá-lo a um estado de desordem e de morte. Por isso a atenção deve se concentrar sobre estas escolhas, para que sejam o mais possível respeitadas da ordem e do ritmo da natureza.

O sistema de fornecimento de energia elétrica convencional não está à disposição em todos os locais de nosso território. Quando se necessita de uma fonte de energia em um local que está longe deste recurso, pode-se deixar de realizar uma importante atividade, por ser inviável técnica e economicamente a expansão do sistema de energia convencional naquela localização. Assim, o desenvolvimento de estudos de energia alternativa é tarefa fundamental e indispensável para que se possa modificar esta situação com o uso de fontes de energia autônoma.

Uma das maiores preocupações no planeta é a questão dos poluentes causados pelas fontes convencionais de energia, que a comunidade científica tenta atenuar

através de pesquisas incessantes. As principais fontes de energia hoje utilizadas, como o petróleo, o carvão e o gás natural, produzem uma grande quantidade de CO<sub>2</sub>, contribuindo para o desordenamento dos vários sistemas ecológicos.

No Brasil, há uma grande produção de energia elétrica através de usinas hidroelétricas, que também causam vários prejuízos aos ecossistemas, prejudicando tanto o ambiente como a população local, com a formação de grandes reservatórios capazes de alterar o microclima.

O campo de pesquisa em energias renováveis amplia-se no mundo inteiro e a gerada por via de atuação em campo magnético tem sido objeto de inúmeras discussões, apresentando-se tecnicamente viável para alguns físicos, engenheiros, inventores e curiosos, mas inviável para outros. O campo magnético, cada vez mais utilizado nas novas tecnologias, tem muito para ser estudado e desenvolvido em pesquisas, tanto nas suas aplicações diretas, como também em composição de novos materiais magnéticos.

Os fenômenos magnéticos, fontes de diversos estudos para aplicações práticas no cotidiano, apresentam grande capacidade potencial de utilização em diversos ramos da tecnologia moderna, sendo atualmente empregados em larga escala em motores elétricos, discos rígidos de computadores, televisores, eletrodomésticos em geral, cartões de créditos, etc.

A geração de energia mecânica através de motores não convencionais, com o destaque neste trabalho para os estudos sobre motores acionados com ímãs permanentes, tem proporcionado grande discussão técnica, evidenciada por diversas patentes depositadas em órgãos oficiais, fóruns de discussão na internet, blogs e vídeos diversos, envolvendo engenheiros, físicos, inventores, curiosos, etc.

Várias formas e modelos de motores apresentados em documentos de patentes oficiais e outros trabalhos experimentais que utilizam o campo magnético como único meio gerador de força para produzir energia mecânica foram, neste trabalho, estudados com o intuito de fazer uma análise de modelos físicos, tentando possibilitar o desenvolvimento de um protótipo com a função de viabilizar uma ação giratória em um rotor.

Para se identificar o status atual no que concerne ao desenvolvimento científico e tecnológico de um rotor acionado com imãs naturais, foi procedida neste trabalho uma exaustiva busca nas bases de dados da produção acadêmica. Do levantamento bibliográfico procedido sobre este tipo de idealização, constataram-se experimentos, encontrados em institutos oficiais, patentes nacionais e internacionais, relatando e reivindicando direitos de propriedade sobre a possibilidade de geração de energia mecânica produzida a partir apenas do campo magnético. Adicionalmente, existem várias tentativas deste aproveitamento de energia que atualmente são divulgadas extensivamente na internet, via textos e vídeos, que necessitam de um processo de comprovação técnica científica.

Este trabalho descreve a elaboração de um estudo de engenharia, sobre a prática e a teoria, do desenvolvimento tecnológico de um rotor magneto.

O objetivo geral, este trabalho é realizar estudos de natureza analítica e experimental sobre o desenvolvimento tecnológico de um rotor magneto visando a geração de energia mecânica.

Como objetivos intermediários, este trabalho visa planejar e executar um processo de medição das forças atuantes entre imãs, pré-escolhidos, para possibilitar a análise mecânica das forças envolvidas em um determinado arranjo de disposição de imãs no rotor e injetor/estator (imã externo); projetar modelos preliminares de rotor magneto, de modo a possibilitar uma análise inicial da sua montagem e arranjo, com base em ferramentas CAD, buscando-se a evolução experimental para o protótipo; construir um protótipo de rotor magneto e realizar testes para avaliação do funcionamento, elaborando sua análise mecânica; e modelar mecanicamente posições estratégicas entre imãs de rotor e injetor para estimar a produção de torque resultante.

A aplicação do magnetismo como uma possível fonte geradora de energia mecânica poderia se constituir num processo de relativo baixo custo e por isso deve-se investigar sua viabilidade técnica na conversão de energia mecânica em energia elétrica. Este processo apresentaria uma vantagem ainda maior pelo fato de não produzir resíduo poluente ao meio ambiente e sem condição potencial de dano físico ou orgânico ao ser humano.

Esta tecnologia desenvolvida poderá ser utilizada para fornecimento de energia elétrica, quando acoplado em geradores ou alternadores, podendo ser utilizados na indústria, em residências, transportes diversos, tanto para fornecimento de luz como para energia de propulsão, sendo seu uso ideal para locais que não tenham condições de acesso à energia convencional como também nos lugares que emergencialmente ocorram casos de desastres naturais.

No caso do Brasil, em especial na região amazônica, onde há um enorme desafio de uso adequado de seus recursos naturais, é fundamental o desenvolvimento de tecnologias apropriadas voltadas para sistemas de aquisição de dados que possibilitem um processo de gestão que promova o seu desenvolvimento de modo sustentável. O desenvolvimento da tecnologia proposta neste trabalho teria um importante campo de aplicação para esta situação, especificamente para o caso de uma plataforma de coleta de dados, que, quando instalada, fica praticamente imersa na cobertura vegetal, portanto, sem possibilidades de acesso às fontes renováveis convencionais de energia, como solar e eólica. Nesse caso, a sua fonte primária de energia, normalmente uma bateria, poderia ter sua recomposição de carga executada por meio de um rotor magneto acoplada a um dínamo.

## CAPÍTULO 2

### *2. Revisão bibliográfica*

Este capítulo revisa o conhecimento teórico sobre o magnetismo, com o processo de magnetização de materiais do ponto de vista macroscópico; os conceitos e fórmulas fundamentais para elaboração da modelagem mecânica das forças magnéticas e a revisão de trabalhos elaborados e/ou patenteados de engenheiros que se utilizam do campo magnético para gerar energia mecânica.

#### 2.1. Magnetismo.

##### 2.1.1. Introdução.

O magnetismo é conhecido pelo homem há milhares de anos, mas o estudo dos seus princípios e mecanismos é relativamente recente. O primeiro contato do homem com o magnetismo certamente envolveu a magnetita, que é o único material que ocorre naturalmente no estado magnético. Mais tarde, com a redução de minérios de ferro e a obtenção de ferro metálico, pode-se constatar que a magnetita pode atrair e repelir o ferro. (PADILHA, 2007).

Embora o eletromagnetismo clássico seja uma ciência praticamente “completa”, o desenvolvimento de materiais magnéticos, com propriedades cada vez melhores, continua até os dias de hoje. (PADILHA, 2007).

O campo magnético é uma região do espaço envolvente de um ímã, onde se manifesta o magnetismo, através das ações magnéticas, ver figura 2.1. Estas ações verificam-se à distância e algumas substâncias são influenciadas pelo campo magnético.

Todos os materiais apresentam algum efeito magnético. Em alguns materiais esses efeitos são muito fracos e são chamados de materiais não magnéticos. (GONÇALVES, 2006).

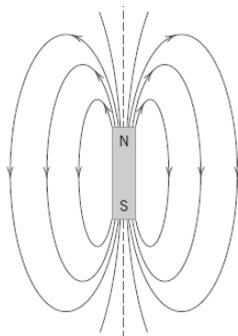


Figura 2.1 – Linhas de força de campo magnético ao redor de uma barra Magnética.

Fonte: Materials Science and Engineering, (CALLISTER, 2007).

O vácuo é o único meio realmente não magnético, que tem fixado sua permeabilidade magnética relativa igual a um. Os materiais são classificados de acordo com o comportamento diante do campo magnético em diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. Todas as substâncias em maior ou menor intensidade tem o seu magnetismo. (GONÇALVES, 2006).

As substâncias ferromagnéticas como o aço, níquel e cobalto são as que se comportam como um ímã na presença de um campo magnético ( $H$ ) externo, figura 2.2. O material ferromagnético em azul, antes desmagnetizado, colocado na presença do campo magnético tende a se magnetizar de modo que o fluxo das linhas de magnetização se encaminha no material do sul para o norte circulando externamente e voltando ao sul.

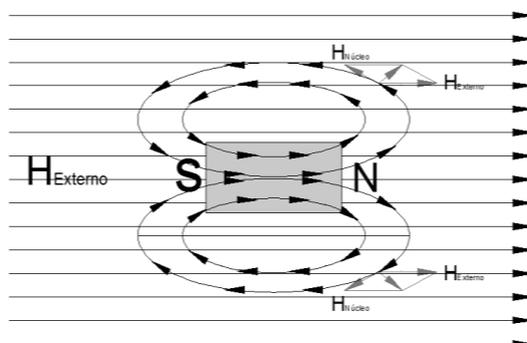


Figura 2.2 – Linhas de campo magnético, ( $H_{Ext}$ ) atravessando um material ferromagnético.

A dependência de  $B$  em relação ao campo externo  $H$  para um material que exibe comportamento diamagnético e paramagnético é apresentado na Figura 2.3.

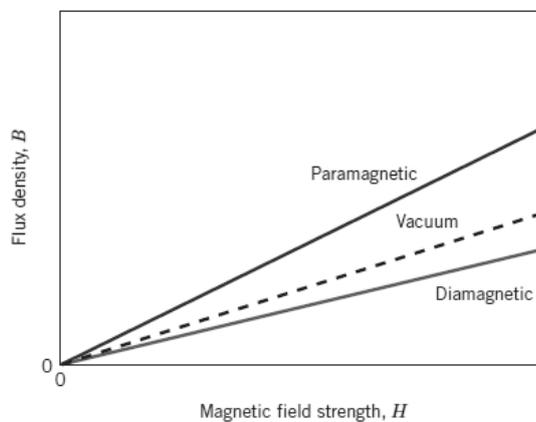


Figura 2.3 - Representação esquemática da densidade de fluxo  $B$  versus força do campo magnético  $H$  para materiais diamagnéticos, paramagnéticos.

Fonte: Materials Science and Engineering, (CALLISTER, 2007).

Os materiais diamagnéticos possuem uma permeabilidade relativa ligeiramente inferior a um (por exemplo, o cobre, com  $\mu_r = 0.999991$ ), e apresentam a característica de que na presença de um campo magnético, se opõem fracamente a ele. Em outras palavras, quando um material diamagnético é colocado na presença de um campo magnético, ele é repelido. Figura 2.4. Exemplos desses materiais são, vidro, água, antimônio, bismuto, chumbo, cobre e gases raros.

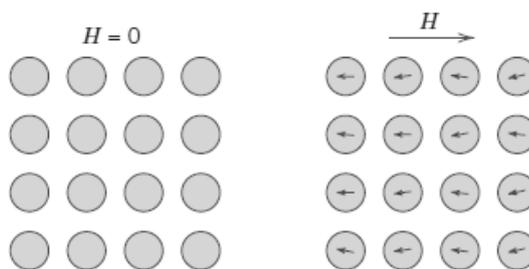


Figura 2.4 – Configuração do dipolo atômico – material paramagnético.

Fonte: Materials Science and Engineering, (CALLISTER, 2007)

Os materiais paramagnéticos possuem uma permeabilidade relativa ligeiramente superior a 1 (por exemplo o alumínio, com  $\mu_r = 1.00000036$ ) e, na presença de um campo magnético os seus momentos de dipolos magnéticos se alinham fracamente com ele. Quando esse campo é retirado, eles voltam a se desalinhar. Em outras palavras, quando um material paramagnético é colocado na presença de um campo magnético ele é atraído por ele. Figura 2.5. Exemplo desses materiais são, oxigênio, sódio, sais de ferro e de níquel, alumínio e silício.

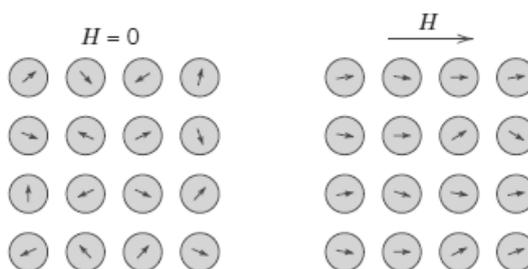


Figura 2.5 – Configuração do dipolo atômico – material diamagnético.

Fonte: Materials Science and Engineering (CALLISTER, 2007)

Alguns tipos de materiais, como por exemplo, o ferro, o níquel e o cobalto, apresentam a propriedade de que seus momentos de dipolos magnéticos se alinham fortemente na direção de um campo magnético, oferecendo assim um caminho preferencial para as linhas de fluxo. Uma liga ferro-silício a 3% possui uma  $\mu_r$  máxima de aproximadamente 55000. A permeabilidade desses materiais não é constante, sendo função da intensidade de campo magnético aplicado, e do estado magnético anterior do material. (GONÇALVES, 2006).

Entender o processo de magnetização e como se comporta o vetor magnetização, na presença das várias anisotropias magnéticas quando inserida num campo externo, é de suma importância para quem trabalha com magnetismo, e ainda pode ser considerado como primeiro passo na montagem de qualquer aparato experimental de investigação magnética.

## 2.1.2. Magnetismo nos materiais

No início do século XIX, cientistas começaram a pensar na matéria magnetizada como sendo constituída de magnetos elementares. Uma ideia semelhante ao senso comum de que a matéria é constituída por átomos e moléculas. Já se conheciam algumas das propriedades dos materiais, porém, uma classificação destes em diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos só ocorreu em meados do século XX com os trabalhos de Pierre Curie. No entanto, uma interpretação satisfatória dos efeitos magnéticos não tinha sido apresentada até então. Explicar o fato de alguns materiais ferromagnéticos possuírem uma grande facilidade de ordenação dos momentos de dipolos magnéticos elementares, em face aos materiais paramagnéticos, era uma tarefa a ser conquistada. (GONÇALVES, 2006)

Uma explicação coerente e satisfatória deste fato ocorreu em 1907, foi Pierre Weiss quem sugeriu a existência de forças de interação entre os momentos magnéticos vizinhos, estas forças agem de tal forma a mantê-los paralelos. Ele previu assim, o perfeito alinhamento dos momentos de dipolos magnéticos de um material ferromagnético na temperatura de 0 K, previu o aparecimento da desordem deste alinhamento com o crescimento da temperatura, e ainda o estado de desordem total para uma temperatura crítica no qual o material ferromagnético transforma-se em paramagnético. Temperatura esta que hoje é conhecida como temperatura de Curie.

Esta explicação de Weiss ainda se mostrou satisfatória quando explicou o fenômeno da magnetização espontânea, fenômeno este no qual se enquadram algumas rochas magnetizadas encontradas na natureza como, por exemplo, as magnetitas. Porém não era suficiente para entender o fato de que a maioria dos materiais ferromagnéticos serem encontrados na natureza com uma magnetização igual ou próxima a zero.

A ideia foi supor que os materiais eram divididos em pequenas porções nas quais a magnetização permanece constante (em magnitude e direção). A estas regiões deu-se o nome de domínios e por isso é conhecida como Teoria de Domínios de Weiss.

De acordo com esta teoria, as interações são capazes de manter o alinhamento paralelo dos momentos ao longo de um único domínio, enquanto que a grande distância pode-se encontrar outra orientação da magnetização, ou seja, em outro domínio.

Portanto, a magnetização total de uma amostra se deve à soma sobre todos os vetores de magnetização dos domínios que compõem o material, podendo esta apresentar valor nulo para vetores distribuídos simetricamente ou com um valor no qual todas as magnetizações estão apontando em uma única direção. Diz-se então que a amostra está saturada. Esta explicação fez desta teoria a melhor aceita até os dias atuais. (GONÇALVES, 2006).

A configuração na figura 2.6(a) se apresenta sob uma forma que minimize a energia. Na ausência de campo magnético externo, esta configuração representa uma amostra desmagnetizada. O número de linhas de campo magnético fora do material é igual a zero, minimizando assim a energia. A aplicação de um campo magnético externo, Figura 2.6(b), provoca a rotação dos momentos de dipolos magnéticos inseridos nesse domínio, de tal forma a mantê-los paralelos à direção deste campo minimizando novamente a energia.

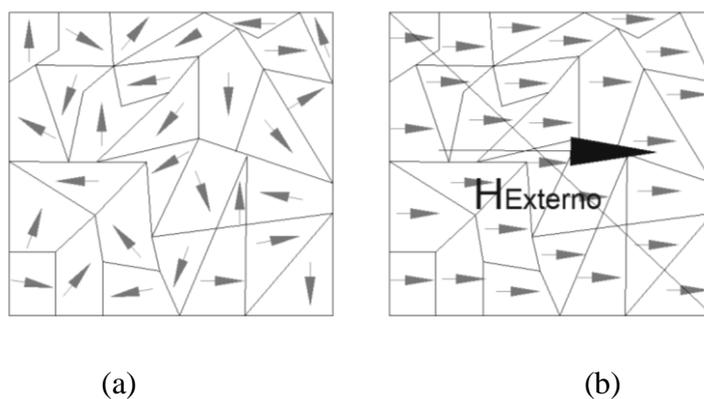


Figura 2.6 - Em (a), domínios magnéticos e respectivas orientações da magnetização. Em (b), domínios magnéticos se orientando com o campo externo aplicado.

Na seção seguinte serão apresentados alguns aspectos do processo de magnetização.

### 2.1.3. Domínio magnético

Um domínio é definido como uma região de material dentro da qual os átomos tem o mesmo alinhamento magnético. Um domínio, portanto comporta-se como um pequeno ímã permanente, e deverá haver um número muito grande destes dentro de uma amostra de material.

Na figura 2.7(a) temos uma amostra de material ferromagnético com os seus domínios aleatoriamente direcionados, de forma que o magnetismo resultante é nulo. Um campo magnético externo é aplicado sobre o material, e seus momentos magnéticos começam a se alinhar com ele. Figuras 2.7(b), e 2.7(c).

A princípio, esse alinhamento é obtido de maneira fácil, isto é, muitos domínios se alinham rapidamente para um campo magnético relativamente pequeno. À medida que o campo magnético vai sendo aumentado, há uma maior dificuldade em se obter novos alinhamentos, figura 2.7(d). Em outras palavras, dá-se origem a um processo de saturação do material magnético.

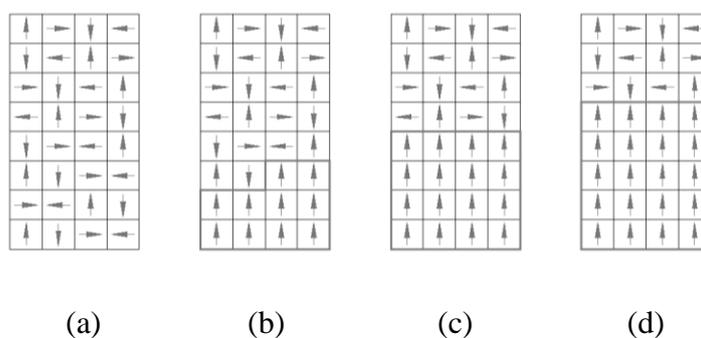


Figura 2.7 - (a) domínios magnéticos desalinhados, (b), (c) e (d) se alinhando com o campo externo.

Se traçarmos uma curva representando a densidade de fluxo resultante ( $B$ ), em função da intensidade de campo magnético ( $H$ ) aplicado, teremos uma curva de magnetização bastante familiar, mostrada na figura 2.8. Podemos notar, em sua parte final, que um grande aumento em  $H$  produzirá um pequeno aumento em  $B$ .

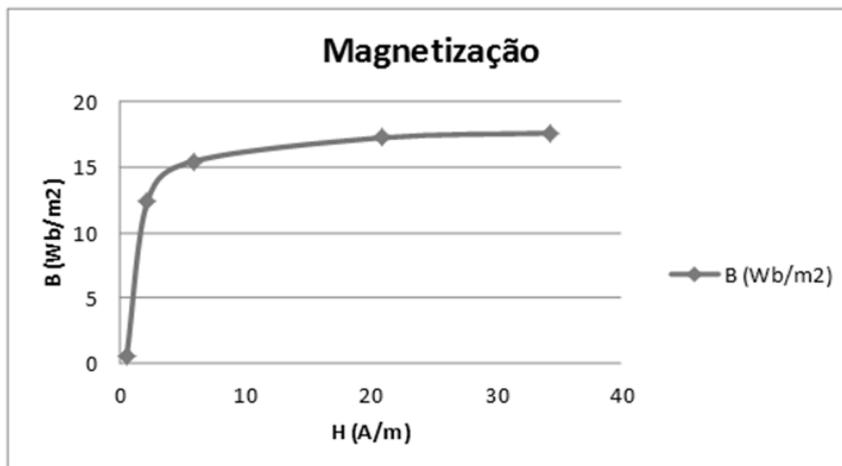


Figura 2.8 - Curva de magnetização de um material magnético.

Se reduzirmos a intensidade de campo magnético aplicado ao material ferromagnético até zero, poderíamos esperar que a densidade de fluxo magnético também voltasse ao seu valor original, zero. Entretanto, isso não ocorrerá. Quando a intensidade de campo magnético for zero, haverá ainda um magnetismo residual na amostra de material ferromagnético.

Quando o campo magnético externo é retirado, os momentos magnéticos dos domínios voltam a se desalinhar, porém parte deles mantém o novo alinhamento obtido quando da aplicação do campo magnético externo. Na verdade, quando o campo externo foi aplicado, energia foi introduzida no material, e o mesmo sofreu uma nova reestruturação. Para mudar isto necessitamos de mais energia. Uma parte dessa energia provém do próprio material quando alguns de seus domínios voltaram ao seu alinhamento original. Porém, para voltar à situação de magnetismo resultante zero, um campo magnético reverso deve ser aplicado sobre o material. (GONÇALVES, 2006).

O fenômeno da histerese magnética é definido como o atraso causado na variação de  $B_r$  (remanescência da densidade de fluxo magnético), devido a uma variação em  $H$ . O ciclo de histerese está representado pela curva contínua; a curva tracejada indica a magnetização inicial (CALLISTER, 2007). A remanência  $B$ , e a força coercitiva  $H$ , também estão mostradas na figura 2.9.

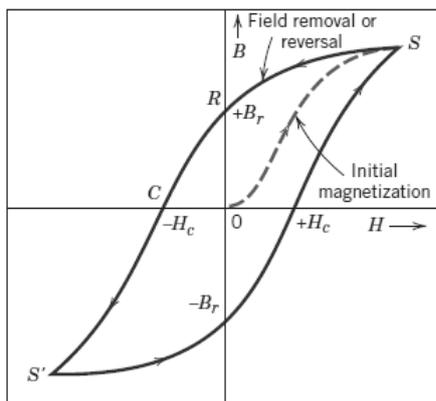


Figura 2.9 - Ciclo de histerese.

Fonte: Materials Science and Engineering (CALLISTER, 2007)

Ao colocar o material ferromagnético para magnetização em um campo magnético externo, acontecem alguns aspectos importantes do ciclo de histerese magnética. Ao retirar o campo magnético externo permanece uma densidade de fluxo no material, para que esse material seja totalmente desmagnetizado é necessário eliminar esse campo remanescente através de um novo campo magnético externo e direção de polos contrários. A curva de desmagnetização (RC) figura 2.9, caracteriza a obtenção dos parâmetros de ímãs permanentes.

Os materiais ferromagnéticos podem ser classificados como macios e duros, conforme gráfico mostrado na figura 2.10. Os materiais macios (soft) apresentam um ciclo de histerese estreito (fácil magnetização) e os materiais duros (hard) apresentam ciclos de histerese largos (difícil magnetização).

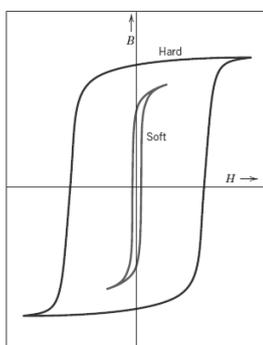


Figura 2.10 - Materiais magneticamente duros e moles.

Fonte: Materials Science and Engineering (CALLISTER, 2007)

### 2.1.4. Força entre dois polos magnéticos

Para definir a força entre dois polos magnéticos considera-se a intensidade da força de cada polo ( $p$ ) e a distancia que os separa ( $r$ ), também envolvendo a permeabilidade do meio, através da constante  $k$  que vale  $10^{-7} N/A^2$ , como será demonstrado adiante. O campo magnético aplicado externamente, chamado de intensidade do campo magnético, é designado por  $H$ , (SCHAUM, 1979).

A indução magnética, ou densidade do fluxo magnético, indicada por  $B$ , representa a magnitude da força do campo interno no interior de uma substância que está sujeita a um campo  $H$ . A unidade de  $B$  é  $Wb/m^2$ . Tanto  $B$  quanto  $H$  são vetores do campo sendo caracterizados não somente por sua magnitude, mas também por sua direção no espaço (CALLISTER, 2007).

A intensidade do campo magnético e a densidade do fluxo estão relacionadas de acordo com

$$B = \mu.H , \quad (2.1)$$

O parâmetro  $\mu$  é chamado de permeabilidade, que é uma propriedade do meio específico através do qual o campo  $H$  passa e onde  $B$  é medido. A unidade é  $Wb/A.m$

No vácuo

$$B_0 = \mu_0.H , \quad (2.2)$$

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade no vácuo, que é uma constante universal com valor de  $4\pi \times 10^{-7} H/m$ . O parâmetro  $B_0$  representa a densidade de fluxo no vácuo.

Vários parâmetros podem ser usados para descrever as propriedades magnéticas dos sólidos. Uma desses parâmetros é a razão da permeabilidade em um material e a permeabilidade no vácuo

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} , \quad (2.3)$$

onde  $\mu_r$  é chamada a permeabilidade relativa, que é adimensional. A permeabilidade ou permeabilidade relativa de um material é uma medida do grau até onde o material pode ser magnetizado, ou a facilidade com a qual um campo B pode ser induzido na presença de um campo externo H, (SCHAUM,1979).

Para os cálculos efetuados neste trabalho, utiliza-se para a permeabilidade do ar a mesma equação para a permeabilidade do vácuo por haver entre elas uma boa aproximação. Para dar simplicidade a alguns cálculos com imãs, embora os polos magnéticos isolados não existam, seu conceito se torna útil.

A força aplicada em cada polo tem um módulo de:

$$F = B.p, \quad (2.4)$$

A força que atua sobre o polo norte tem mesma direção que o campo e sentido de B, e o oposto a correspondente sobre o polo sul. A unidade de F é Newton, B é N/A.m e p é A.m.

A força exercida entre dois polos magnéticos ( $p$  e  $p'$ ) separados por uma distância  $r$  é

$$F = k \frac{pp'}{r^2}, \quad (2.5)$$

$$\text{onde } k = \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \frac{N}{A^2}.$$

A força que exerce um polo de intensidade  $p$  sobre outro de intensidade  $p'$  a uma distancia  $r$ , no vácuo, é  $F = k \frac{pp'}{r^2}$ , o valor de  $pp'$  é

$$pp' = \frac{F.r^2}{k}, \quad (2.6)$$

Como neste estudo os imãs são iguais então  $p = p'$  implica que,

$$p = \sqrt{\frac{F.r^2}{k}}, \quad (2.7)$$

## 2.2. Patentes

O desenvolvimento tecnológico de um motor acionado com ímãs permanentes tem sido pouco divulgado na literatura técnica especializada. Em face disso, neste trabalho, o levantamento bibliográfico foi direcionado para o processo de busca por patentes que foram encontradas em institutos oficiais tanto nacional como internacional. Na internet encontram-se demonstrações por meio de vídeos e textos, da existência de inúmeras tentativas para aproveitamento da força magnética por vários tipos de máquinas usando esta tecnologia.

Em consulta a base de patentes foi encontrada a inscrita na United States Patent and Trademark Office (USPTO) sob o nº 4.151.431, de 24/04/1979, de Howard Johnson, onde o autor menciona ser um dispositivo capaz de produzir energia livre ilimitada com zero de impacto ambiental.

Esta patente foi destaque na publicação da revista *Ciência e Mecânica* edição de primavera 1980, com direitos autorais original de Davis Publications, Inc., Johnson explica sua patente como um dispositivo semelhante a um motor elétrico que produz trabalhos sem entrada elétrica, utilizando-se apenas de ímãs permanentes para produzir força motriz. A figura 2.11, mostra o motor de ímã de Johnson, que gira um tambor que tem uma correia acoplada a um gerador convencional, produzindo energia elétrica.

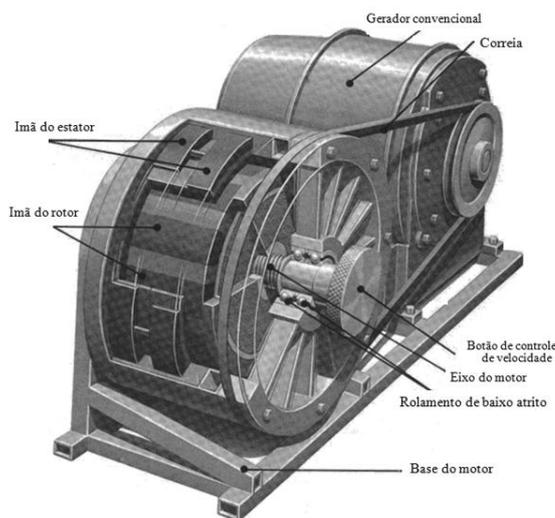


Figura 2.11 - Motor magnético de Howard Johnson. Patente (USPTO – 4.151.431)

Fonte: Revista *Ciência e Mecânica* edição de primavera 1980.

A figura 2.12, mostra o arranjo proposto entre o rotor e o estator, que segundo o inventor resultaria em uma força com sentido anti-horário.

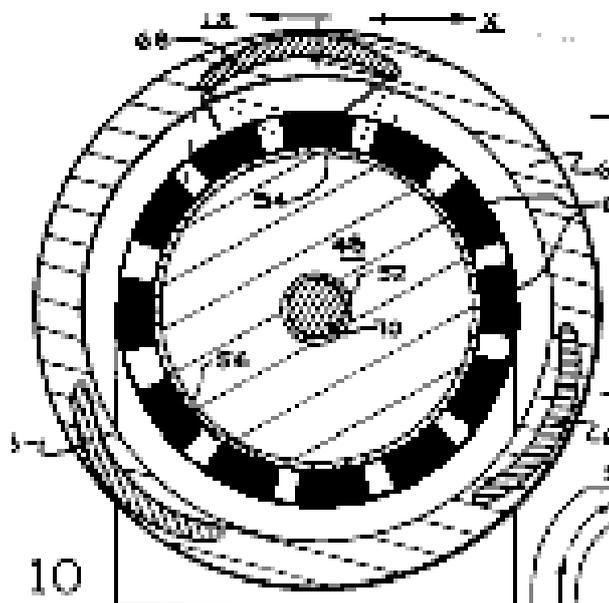


Figura 2.12 – Rotor e estator do motor magnético de Johnson.

Fonte: Revista Ciência e Mecânica edição de primavera 1980.

As linhas contínuas representam as forças de atração e as tracejadas as de repulsão. As linhas duplas representam as forças mais importantes para a realização do trabalho útil, conforme detalhamento apresentado na figura 2.13.

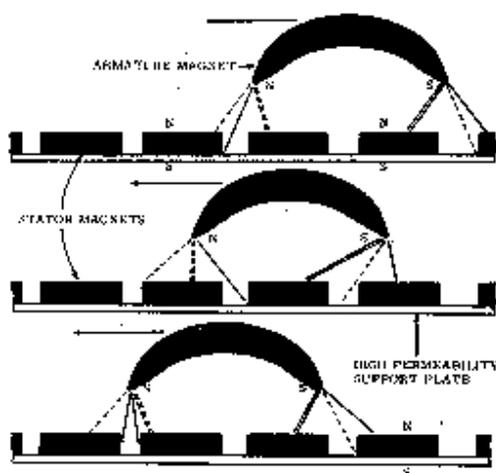


Figura 2.13 – Armadura (rotor) com movimento da direita para a esquerda.

Fonte: Revista Ciência e Mecânica edição de primavera 1980.

Johnson explica que, a distância entre os polos norte e sul do ímã com forma de ferradura deverá corresponder a dois ímãs e meio dos ímãs retos, existindo uma força resultante na direção lateral.

Para Johnson, o que alguns podem chamar de movimento perpétuo, acredita ele que é o aproveitamento da energia magnética, com base em "informações e teoria que diz respeito ao movimento atômico que ocorrem dentro de um ímã permanente". Para obter registro da sua patente, Johnson levou cinco anos e meio a partir da data do depósito original e muitas batalhas legais travadas com o escritório de patentes, pois segundo o autor existiria uma "política" de não patentear qualquer dispositivo que, de qualquer forma se assemelhasse a um moto contínuo.

No Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) foi encontrada a patente de nº PI8900294 A, depositada em 14/08/1990, de Mauro Caldeira Malafaia, com modelo proposto mostrado na figura 2.14, apresenta um motor magnético auto-tracionado, gerando força motriz dinâmica a partir da energia potencial estática dos ímãs permanentes, na medida em que aumenta o número de cilindros, aumentaria também a força do torque e a velocidade do conjunto.

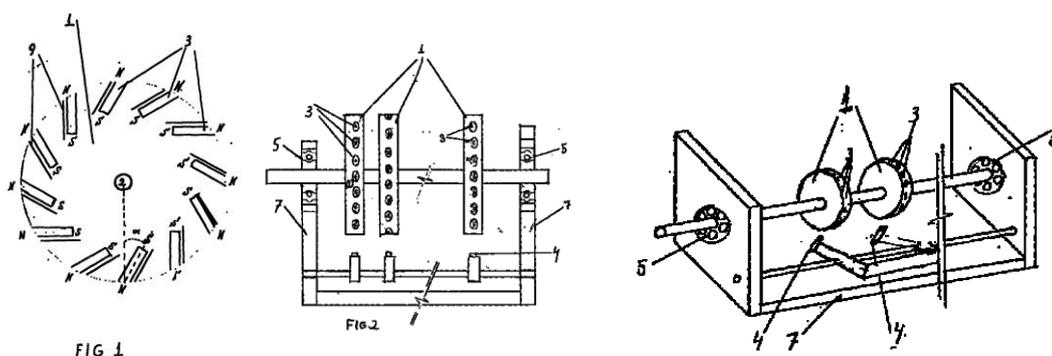


Figura 2.14 – Patente de Mauro Malafaia (INPI - PI8900294 A)

Fonte: Base de patentes do INPI.

Esta patente mostra que os ímãs (3) posicionados no cilindro(1) tem uma inclinação com o eixo radial para combinar com a inclinação do ímã na base (4) que faz a repulsão e afasta-se do rotor para que no outro cilindro aconteça a nova impulsão.

Outra patente depositada no INPI foi a patente de nº PI0704805 A, de 28/07/2009, de Antônio Augusto Nunes Gonçalves, com modelo proposto mostrado na figura 2.15, apresenta um motor magnético que, através da combinação da força de repulsão de ímãs e da força de tração de molas, proporcionaria movimento rotatório constante em um eixo, em que se aumentando a quantidade de elementos impulsionadores o rotor tende a uma maior velocidade de rotação.

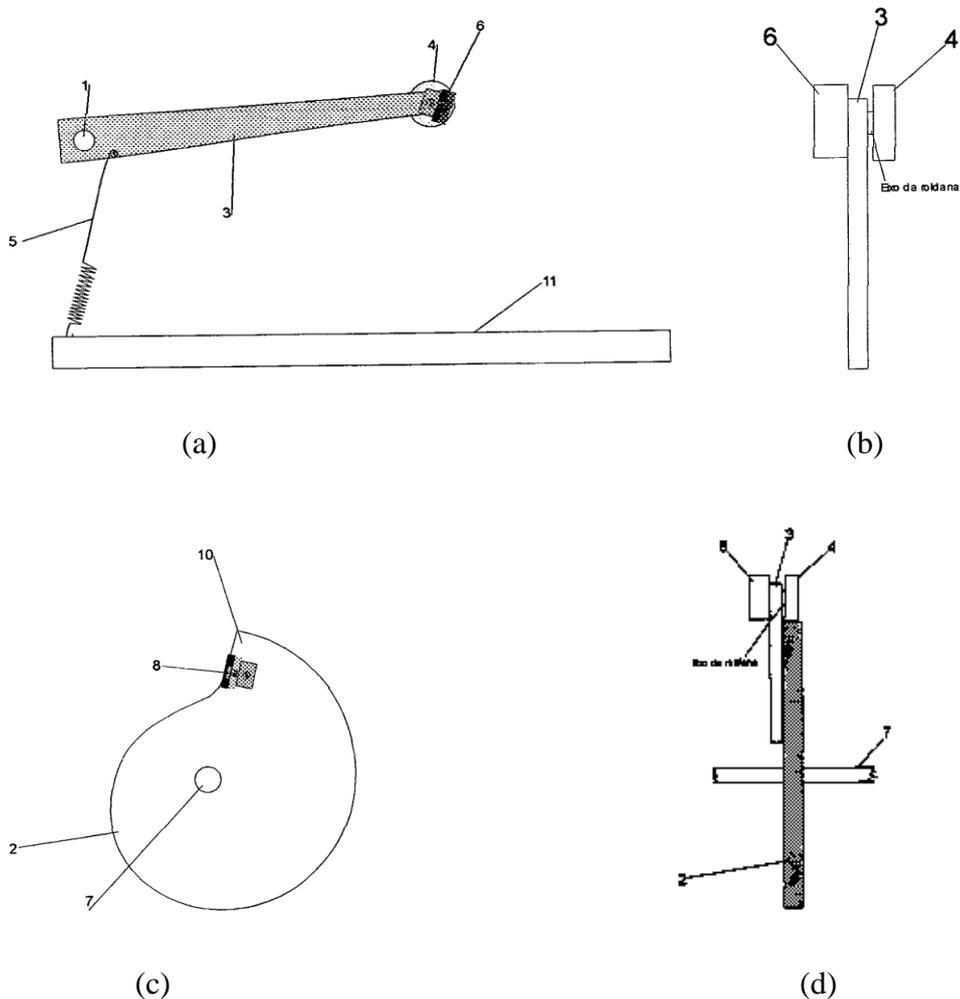


Figura 2.15 – Patente de Antônio Gonçalves (INPI - PI0704805 A)

Fonte: Base de patentes do INPI.

A figura 2.15(a) apresenta um dos conjuntos de alavanca (3), mola de tração (5), eixo fixo (1), roldana (4), ímã (6) e a base (11) que compõe parte da presente invenção. A figura 2.15(b) mostra vista frontal da alavanca no lado oposto ao eixo (1), onde pode ser

visto o ímã (6), a alavanca (3) e a roldana (4). A figura 2.15(c) mostra o cames (2), Acoplado no eixo móvel (7) com o ímã (8) fixado no ressalto (10) do cames. A figura 2.15(d) mostra o ímã (6) que está fixado na alavanca (3) que está apoiada através da roldana (4), sobre o cames (2) que está acoplado no eixo móvel (7).

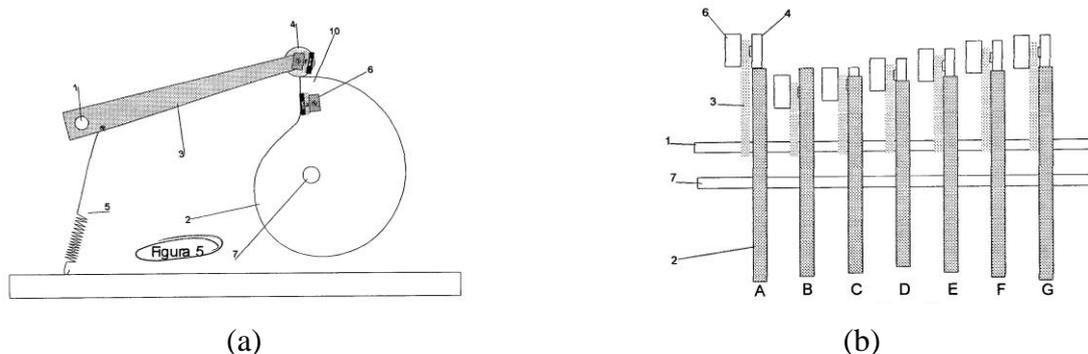


Figura 2.16 – Patente de Antônio Gonçalves (INPI - PI0704805 A)

Fonte: Base de patentes do INPI.

A figura 2.16(a) mostra um dos conjuntos de alavancas (3) fixado em um eixo (1) e uma roldana na extremidade (4) em posição de trabalho, momentos antes de vencer o ressalto (10) do cames (2) que gira em sentido horário. A mola (5) traciona a alavanca (3) auxiliando o movimento da alavanca para baixo, visando a repulsão do ímã (6). A figura 2.16(b) mostra todos os cames (2) acoplados no eixo móvel (7).

Em 2002, Robert H. Calloway propôs uma modificação no motor de Johnson, com modelo mostrado na figura 2.17 e folha de fabricação mostrada na figura 2.18, que estaria pronto para divulgar como construir um motor de ímã, e diz revelar o mecanismo da construção do motor através de folha de fabricação em [http://pesn.com/2010/07/31/9501681\\_Revealing\\_What\\_I\\_Know\\_About\\_Building\\_the\\_Pereudev\\_Magnet\\_Motor/Blueprints/index.html](http://pesn.com/2010/07/31/9501681_Revealing_What_I_Know_About_Building_the_Pereudev_Magnet_Motor/Blueprints/index.html), acesso em 17/12/2010.



Figura 2.17 - Modificação do Motor Magnético por Robert H Calloway.

Fonte: [http://pesn.com/2010/07/31/9501681\\_Revealing\\_What\\_I\\_Know\\_About\\_Building\\_the\\_Perendev\\_Magnet\\_Motor/Blueprints/index.html](http://pesn.com/2010/07/31/9501681_Revealing_What_I_Know_About_Building_the_Perendev_Magnet_Motor/Blueprints/index.html), acesso em 17/12/2010.

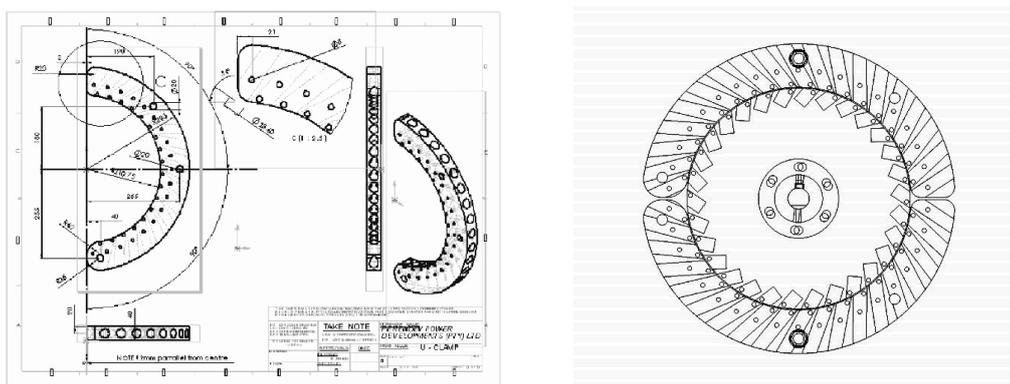


Figura 2.18 – Representação dos ímãs do rotor/estator da modificação de Calloway.

Fonte: [http://pesn.com/2010/07/31/9501681\\_Revealing\\_What\\_I\\_Know\\_About\\_Building\\_the\\_Perendev\\_Magnet\\_Motor/Blueprints/index.html](http://pesn.com/2010/07/31/9501681_Revealing_What_I_Know_About_Building_the_Perendev_Magnet_Motor/Blueprints/index.html), acesso em 17/12/2010.

Para Lopes (2007), em seu Relatório Final da construção de um motor magnético do tipo Perendev, descreve que o experimento baseia-se na instabilidade e no baixo grau de liberdade do sistema magnético, conforme figura 2.19. A Perendev Power Holding AG é uma empresa localizada na Alemanha que fabrica equipamentos de ampla gama de soluções de energia alternativa.

Os ímãs são arranjados no perímetro do rotor com um espaçamento angular de  $20^\circ$ , dispostos com a mesma polaridade, em um ângulo de  $27^\circ$  em relação ao raio do rotor. (segundo Perendev este ângulo poderia ser entre  $20^\circ$  e  $40^\circ$ ).

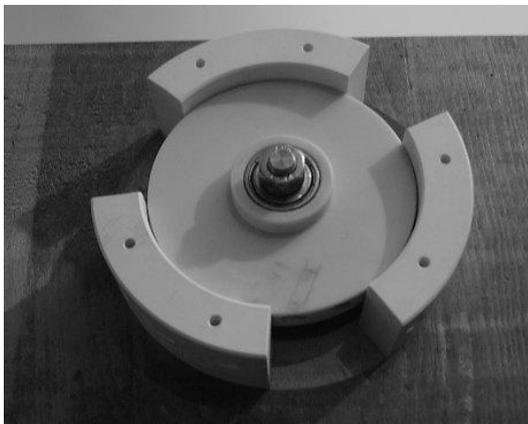


Figura 2.19 - Motor magnético do tipo Perendev, por Felipe Lopes.

No relatório de Lopes (2007), o autor descreve que

... as peças móveis foram construídas de um material não magnético (alumínio), porém quando fomos realizar a montagem do aparato percebemos que conforme a roda se movimentava, ocorria uma variação de fluxo magnético nas peças de alumínio e devido a isto apareciam as chamadas correntes de Foucault, este por sua vez induzia um campo magnético que atrapalhava o movimento. Esses campos faziam com que a roda tivesse muita dificuldade para girar mesmo na ausência dos ímãs presos as peças externas. (Felipe Robles Lopes, Construção de um motor magnético do tipo Perendev, UNICAMP/SP, 2007).

Do experimento de Lopes pode se identificar problemas idênticos em outros modelos no caso de se usar materiais com mesmas propriedades magnéticas do que foi usado, evitando-se as citadas Correntes de Foucault. Estas são correntes elétricas que aparecem em massas metálicas, como consequência da variação de fluxo que as atravessam

por magnetismo, chamadas também de rodamoinho ou turbilhonares. Podem acarretar dissipação de energia e elevar a temperatura das peças metálicas, quando a sua intensidade é alta devido à pequena resistência elétrica (ôhmica) dessas massas, quando o efeito térmico (joule) incumbe-se de propiciar uma grande elevação da temperatura.

Para Lopes, os resultados obtidos nos seus experimentos, não foram suficientes para obter a melhor disposição dos ímãs, pois como antes mencionado, os ímãs foram fixados no rotor, não sendo possíveis testes em configurações diferentes.

## 2.3. Softwares utilizados

### 2.3.1. AutoCAD®

Utilizado neste trabalho para desenho de projeto dos modelos e obtenção das posições estratégicas para análise das forças magnéticas motoras e resistivas o AutoCAD® é um software do tipo CAD (Computer Aided Design ou Desenho Auxiliado por Computador), criado e comercializado pela Autodesk, Inc., San Rafael, Califórnia, EUA, 1982. É utilizado principalmente para a elaboração de peças de desenho técnico em duas dimensões (2D) e para criação de modelos tridimensionais (3D).

Além dos desenhos técnicos, o software vem disponibilizando, em suas versões mais recentes, vários recursos para visualização em diversos formatos. É amplamente utilizado em arquitetura, design de interiores, engenharia mecânica, engenharia geográfica, engenharia elétrica e em vários outros ramos da indústria.

### 2.3.2. SolidWorks®

Utilizado neste trabalho para desenho de projeto dos modelos o SolidWorks® é um software do tipo CAD (Computer Aided Design ou Desenho Auxiliado por Computador), criado e comercializado pela Dassault Systèmes S.A., sediada em Vélizy,

França, 1997. É utilizado para a criação de modelos tridimensionais (3D) e elaboração de desenho técnico de modelos bidimensionais (2D).

O SolidWorks® baseia-se em computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de formas geométricas elementares. No ambiente do programa, a criação de um sólido ou superfície começa com a definição de certos elementos relacionados geometricamente entre linhas, vértices e curvas, no esboço 2D.

### 2.3.3. Maxwell®

Utilizado neste trabalho para modelamento das forças resistivas magnéticas o Maxwell® é um software tipo CAE (Computer Aided Engineering ou Engenharia Auxiliada por Computador), criado e comercializado pela Ansoft Corporation, parte da ANSYS, Inc., sediada em Canonsburg, Pensilvânia, EUA, 1984. É utilizado na modelagem de projetos magnéticos e eletromagnéticos para concepção de estudo de modelos de duas e três dimensões, tais como motores, sensores, transformadores e outros dispositivos elétricos e eletromecânicos. É baseado no FEM (Finite Element Method ou Método dos Elementos Finitos) e calcula com precisão cargas estáticas, harmônica de campos eletromagnéticos e elétricos, bem como transientes em problemas de campo.

Um dos principais benefícios do Maxwell® é o seu processo de solução automatizada onde só necessita ser informada a geometria, propriedades dos materiais e a solução desejada. A partir deste ponto, Maxwell® irá gerar automaticamente uma malha adequada, eficiente e precisa para resolver o problema eliminando a complexidade articulada ao processo de análise, permitindo os engenheiros beneficiar-se de um eficiente fluxo de projeto.

## CAPÍTULO 3

### ***3. Testes experimentais***

Foram realizados dois testes experimentais durante a fabricação do protótipo. O primeiro sobre a força dos ímãs para identificar a função característica do experimento relacionando a intensidade da força entre dois polos magnéticos iguais (norte) posicionados frente a frente e a distancia que os separa. O segundo experimento serviu para a confirmação do material utilizado como isolante magnético no polo sul de cada ímã, visando a diminuição da intensidade do campo magnético nos espaços onde se poderia gerar resistência magnética.

#### **3.1. Força dos ímãs**

##### **3.1.1. Introdução**

O experimento concebido e realizado visou à obtenção da quantificação dos valores das forças de atração/repulsão dos ímãs usados para serem aplicados na modelagem das forças magnéticas para o balanço das forças, objetivando diagnosticar as condições de seu movimento.

Os ímãs de neodímio usados no protótipo foram adquiridos em lojas especializadas. Eles apresentam forma de disco com diâmetro de 12 mm e largura de 5 mm, conforme figura 3.1.

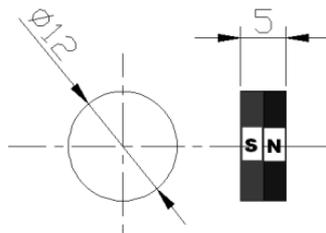


Figura 3.1 – Geometria e dimensões do ímã utilizado no experimento.

### 3.1.2. Local e materiais usados

O ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica Aplicada (LAMEC) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE. Nesse laboratório, o valor da aceleração da gravidade é  $9,78 \text{ m/s}^2$ , que se utilizou para garantir uma resolução no tratamento de dados. O laboratório, no momento do experimento, estava em ventilação natural e a temperatura ambiente era de aproximadamente  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Os materiais usados foram: ímãs cilíndricos terras raras de neodímio (NdFeB), com dimensões de  $\text{Ø}12 \times 5\text{mm}$ ; balança eletrônica modelo LC5, capacidade de carga máxima de 5000g, resolução de 1g, temperatura de trabalho de 10 a  $40^\circ\text{C}$  e tempo de estabilização de 3s; régua graduada em escala de milímetros; base magnética para fixação do ímã; e fita adesiva.

### 3.1.3. Metodologia

Os testes de medição de força foram concebidos para se identificar as forças de repulsão e atração em diversas distâncias de entreferro. O arranjo do ambiente do teste foi organizado de modo que a balança e a base magnética utilizadas tivessem uma flexibilidade de posicionamento, para facilitar nos momentos de colocação das cargas para as medições.

Inicialmente um ímã é preso na plataforma de carga da balança com fita adesiva, polo norte para cima, como mostra a figura 3.2.



Figura 3.2 – Detalhe de fixação do ímã plataforma da balança

Outro ímã é preso com fita adesiva na extremidade da haste da base magnética, conforme figura 3.3, com o polo norte para baixo.

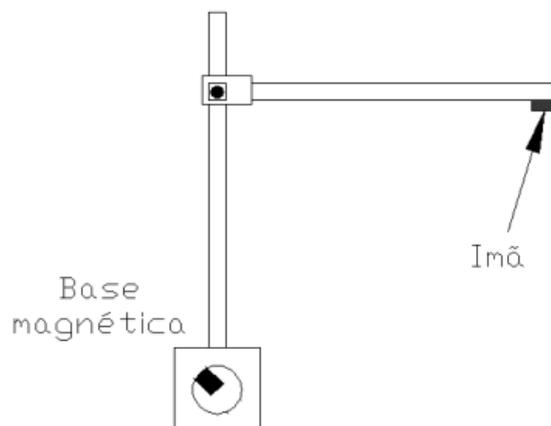


Figura 3.3 – Detalhe de fixação do ímã na extremidade da haste

Quando dispostos polos iguais frente a frente ocorre uma ação de repulsão entre ímãs, e em face do aparato de medição montado passa a atuar uma força na balança. A cada posicionamento do ímã da base magnética, mais próximo do ímã da balança, tem-se uma maior força. A leitura é feita diretamente no display da balança, indicando a força de repulsão entre os ímãs, que vai aumentando com a sua aproximação (Figura 3.4).

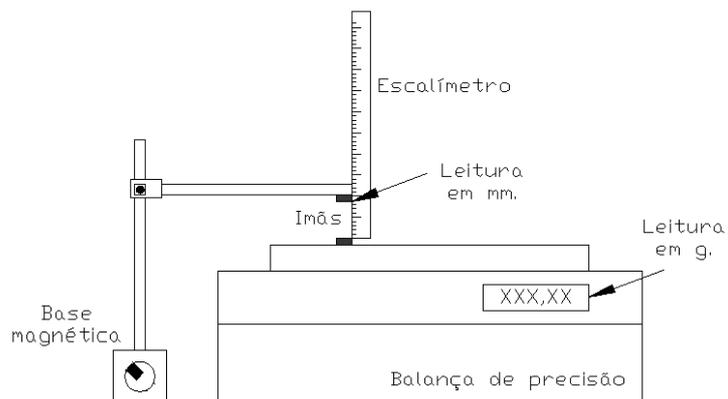


Figura 3.4 - Ímãs posicionados com polos iguais frente a frente, para a condição de repulsão.

### 3.1.4. Valores amostrais

Foram realizadas vinte e duas medidas com valores amostrais obtidos na relação entreferro x massa, utilizando-se a balança de precisão. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Resultados experimentais para Gap x Massa.

Ensaio	Gap (mm)	Massa (g)	Ensaio	Gap (mm)	Massa (g)
1	78,0	4,0	16	15,0	88,9
2	68,0	5,1	17	13,5	92,0
3	58,0	7,1	18	13,0	96,1
4	48,0	10,2	19	12,0	122,7
5	39,0	15,3	20	11,5	139,0
6	33,5	20,4	21	11,0	159,5
7	29,6	25,5	22	10,0	204,5
8	27,0	30,6	23	9,0	255,6
9	21,5	37,8	24	7,5	341,5
10	21,0	40,9	25	7,0	382,4
11	20,0	44,9	26	6,0	523,5
12	19,0	54,1	27	4,5	743,3
13	18,0	61,3	28	3,5	929,4
14	17,0	71,5	29	3,0	1302,6
15	16,0	81,8			

Convertendo-se os valores das massas adquiridos durante o ensaio, convertendo a massa em força (Newton), tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resultados experimentais para Gap x Força.

Ensaio	Gap (m)	Força (N)	Ensaio	Gap (m)	Força (N)
1	0,0780	0,04	16	0,0150	0,87
2	0,0680	0,05	17	0,0135	0,90
3	0,0580	0,07	18	0,0130	0,94
4	0,0480	0,10	19	0,0120	1,20
5	0,0390	0,15	20	0,0115	1,36
6	0,0335	0,20	21	0,0110	1,56
7	0,0296	0,25	22	0,0100	2,00
8	0,0270	0,30	23	0,0090	2,50
9	0,0215	0,37	24	0,0075	3,34
10	0,0210	0,40	25	0,0070	3,74
11	0,0200	0,44	26	0,0060	5,12
12	0,0190	0,53	27	0,0045	7,27
13	0,0180	0,60	28	0,0035	9,09
14	0,0170	0,70	29	0,0030	12,74
15	0,0160	0,80			

### 3.1.5. Análise dos resultados

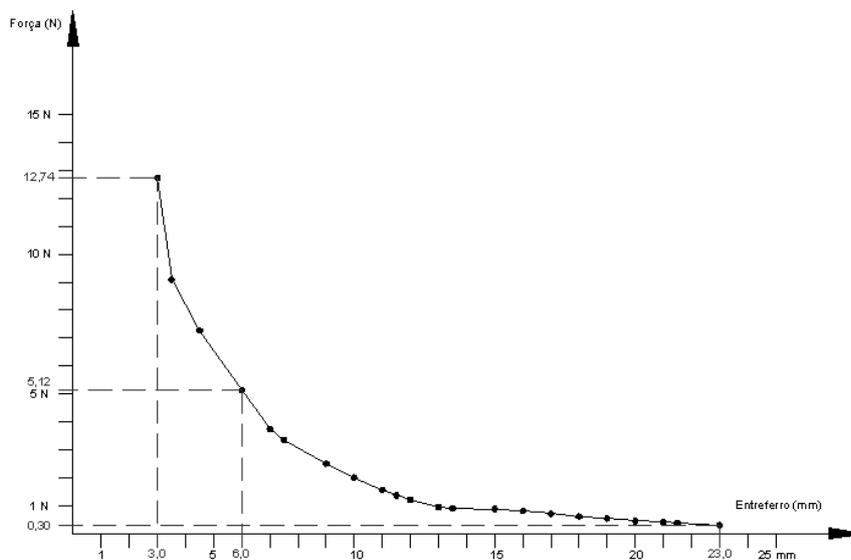


Figura 3.5 – Gráfico da força magnética x distância entre ímãs.

A figura 3.6 mostra em azul a linha do entreferro, considerada em relação à sequência de amostras observadas, na medida em que se diminui a distância entre os ímãs, e em vermelho a linha das forças de repulsão na mesma condição anterior.

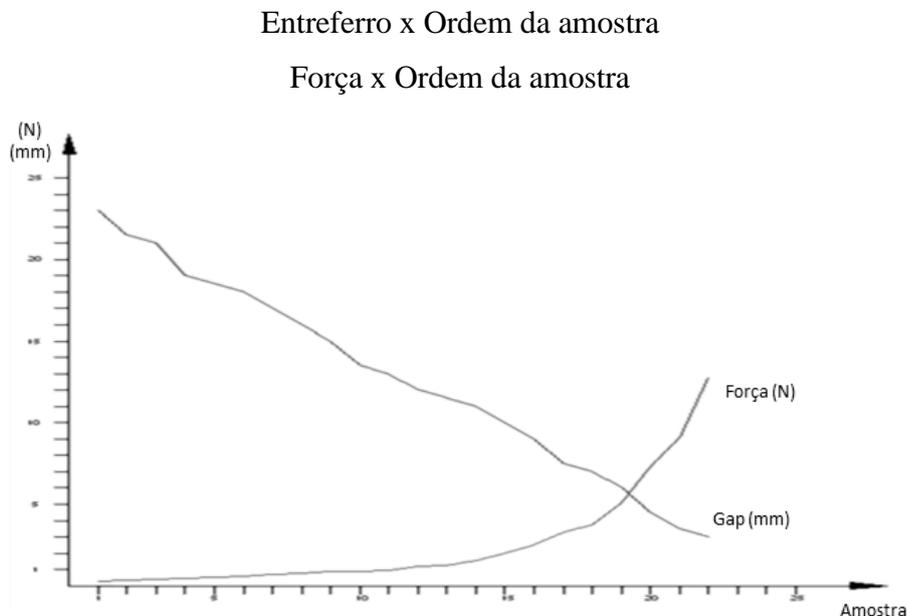


Figura 3.6 - Gráfico mostrando separadamente os valores adquiridos no experimento relacionando o entreferro e a força com a ordem da amostra.

Diante dos resultados amostrais, pode-se calcular a força do polo dos ímãs em estudo. Pelos dados amostrais, considerando o cálculo das forças e utilizando-se o software Excel, tem-se a linha de tendência como função de potência, conforme a figura 3.7, quando relaciona o entreferro com a força magnética.

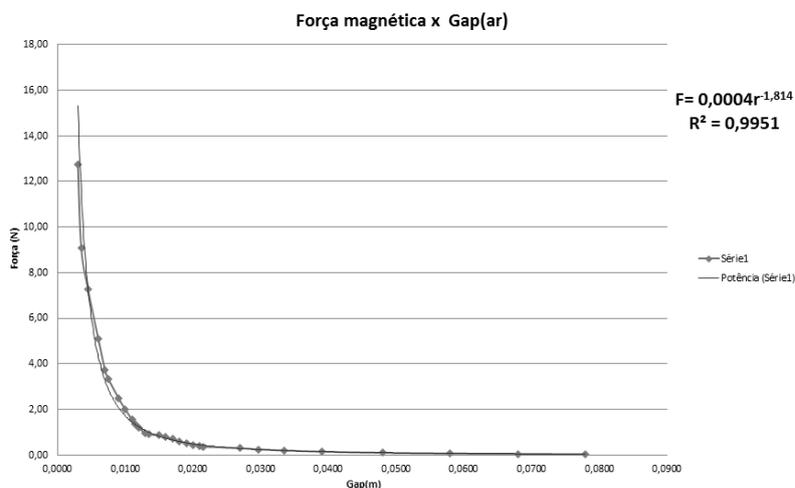


Figura 3.7 - Gráfico da curva Força x Gap.

$$F = \frac{0,0004}{r^{1,814}}, \quad (3.1)$$

De acordo com a função descrita, tem-se o valor da constante  $kpp'$ ,

$$kpp' = 0,0004, \quad (3.2)$$

Para observar a diferença corrigida do cálculo da força, toma-se como exemplo a amostra 26, retirada da tabela 3.2, relacionada com a distância entre imãs associada ao campo magnético do experimento, que, para uma distância de 0,006 m, tem 5,12 N; tem-se, então:

$$F = \frac{0,0004}{r^{1,814}}$$

para  $r = 0,006$

$$F = \frac{0,0004}{0,006^{1,814}} = \frac{4 \times 10^{-4}}{0,932 \times 10^{-4}} = \frac{4}{0,932} = 4,29 N$$

Para a amostra 26 da tabela 3.2, o valor da força (N), experimental e corrigida de acordo com a função 3.1, encontra-se exemplificada na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Resultados exemplo da amostra corrigida.

Exemplo	Gap(m)	Força(N)
Amostra 26	0,0060	5,12
Amostra 26 corrigida	0,0060	4,29

Calculando o valor da intensidade do polo, tem-se:

$$kpp' = 0,0004$$

$$p = p'$$

$$k = 10^{-7}$$

$$kp^2 = 0,0004$$

$$p^2 = \frac{0,0004}{10^{-7}} \therefore p^2 = 4 \times 10^3$$

$$p = \sqrt{4000} \therefore p = 63,24 A.m$$

Com estes cálculos, obtém-se o valor da intensidade do polo magnético de cada imã utilizado,  $p = 63,24A.m$ . Por outro lado, conforme a equação 3.1, a sua forma obtida experimentalmente ratifica o modelo matemático da função teórica.

No próximo item serão analisados os efeitos da blindagem magnética utilizadas nos imãs, na tentativa de isolar um polo magnético.

## 3.2. Material isolante

Para o isolante do campo magnético foi identificado um material de alta permeabilidade, para poder minimizar ao máximo o campo magnético entre os dois polos sul dos imãs do rotor e do injetor. O isolante magnético atua fazendo com que o fluxo de linhas do campo magnético que preferencialmente tende a transitar pelo material mais permeável, diminuir sua intensidade no espaço aéreo entre os imãs, como mostra a simulação no Software MAXWELL®, na figura 3.8.

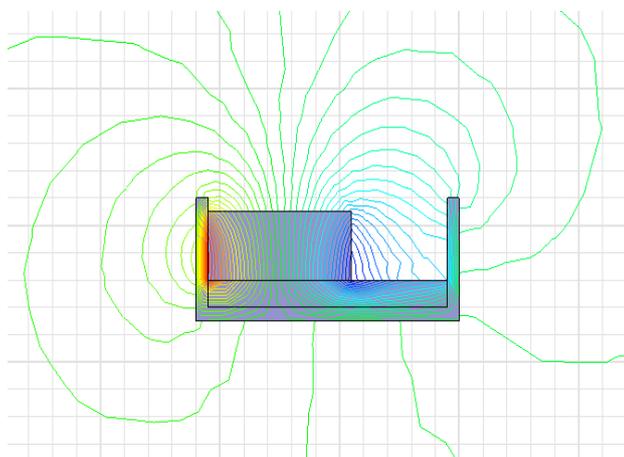


Figura 3.8 – Simulação real com aplicação do material (imã com isolante) em uso. software Maxwell®.

### 3.2.1. Metodologia e equipamento

Utilizou-se o método de fluorescência de raios X como ferramenta para Identificação Positiva de Materiais (PMI), que possibilita uma verificação da composição

química da amostra de maneira não destrutiva, em uma análise rápida de 10 a 30 segundos tipicamente.

O equipamento utilizado para o PMI foi o analisador portátil XRF, da INOVAK, conforme figura 3.9, de Propriedade da empresa Braskem Indústrias Químicas, unidades UPVC-AL e CS-AL, SPIE/Engenharia de Manutenção e Confiabilidade, Maceió-AL.



Figura 3.9 – Analisador portátil XRF da INOVAK.

Fonte: Valdson Ferreira, 2010.

PMI é um teste não destrutivo (NDT) para aceitar ou rejeitar materiais usados. É tipicamente usado para verificar se a liga utilizada está correta, se tem a composição química esperada e também verificar possíveis impurezas indesejáveis.

O PMI é realizado com o propósito de atender a legislações locais e/ou internacionais, como ASTM (American Society of Testing Materials), ASME (American Society of Mechanical Engineers) e PED (European Pressure Equipment Directive).

As características mais importantes do tubo de Raios X para este tipo de equipamento são: tensão elétrica, potência, tipo de alvo e filtros, com a tensão máxima que determina a energia de excitação de 40 a 50 kV e permite a análise dos elementos em diferentes tipos de materiais.

### 3.2.2. Resultado e características

De acordo com os testes realizado, o material escolhido para funcionar como blindagem magnética é classificado, de acordo com a ASTM, como aço 430. A figura 3.10 mostra o equipamento enquanto o material é testado, indicando com melhor visibilidade os elementos constituintes na tabela 3.3.

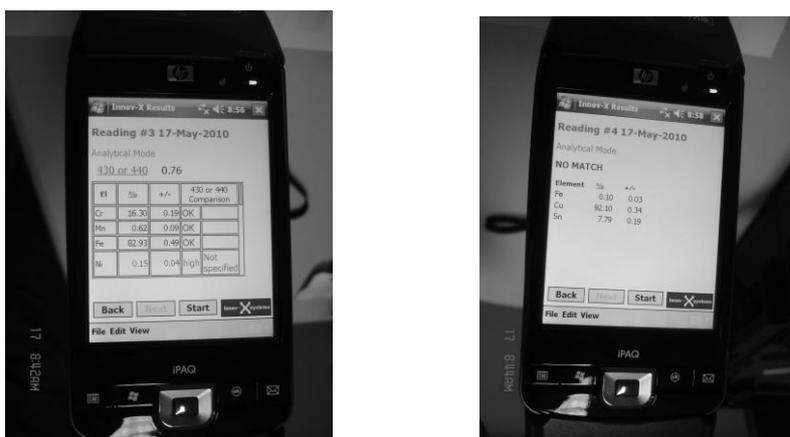


Figura 3.10 - Analisador portátil XRF. Equipamento de ensaio para detectar o material da liga observada. Fonte: Valdson Ferreira, 2010.

Os resultados do analisador portátil encontram-se na tabela 3.4. Em comparação com o material obtido, a liga em questão dá a sugestão de aço 430 ou 440.

El	%	+/-	430 or 440 Comparison	
Cr	16.30	0.19	OK	
Mn	0.62	0.09	OK	
Fe	82.93	0.49	OK	
Ni	0.15	0.04	high	Not specified

Figura 3. 11 – Resultado descrito no analisador portátil

A série 400 dos aços inoxidáveis ferríticos tem propriedades magnéticas com estrutura cúbica de corpo centrado, basicamente ligas Fe-Cr. O aço 430 tem boa permeabilidade, para servir de isolante magnético, contendo 16 a 18% de cromo e um máximo de 0,12% de carbono. Entre suas aplicações típicas, podem-se mencionar talheres,

baixelas, fogões, pias, moedas e balcões frigoríficos. É um material com ótima resistência à corrosão, com uma boa capacidade de estampagem que não seja profunda e tem sua maior limitação para a utilização com soldagens. As aplicações se restringem, portanto, àquelas que não precisam de soldagem, ou quando as soldas não são consideradas operações de responsabilidade.

Um dos maiores problemas do inox 430 é a perda de ductilidade nas regiões soldadas, que normalmente são frágeis e de menor resistência à corrosão. O elevado crescimento do tamanho de grão, a formação parcial de martensita e a precipitação de carbonitretos de cromo são as principais causas geradoras deste problema. Para enfrentar este inconveniente, são adicionados titânio e/ou nióbio como estabilizadores do carbono.

## CAPÍTULO 4

### 4. Desenvolvimento do protótipo

#### 4.1. Primeiro modelo

Modelo para um teste inicial do comportamento da ação rotativa. O modelo inicial foi construído em um disco de madeira de 120 mm de diâmetro e 15 mm de espessura, sendo montado em um mancal vertical, mostrado na figura 4.1. Foram dispostos 5 ímãs ao seu redor, de modo que, com a aproximação manual do ímã externo (injetor), pudesse causar um movimento rotativo. Foram escolhidos cinco ímãs igualmente espaçados em um setor angular de 72 graus, visando a uma distância entre eles de modo a permitir, com a aproximação manual do ímã externo, um movimento contínuo.

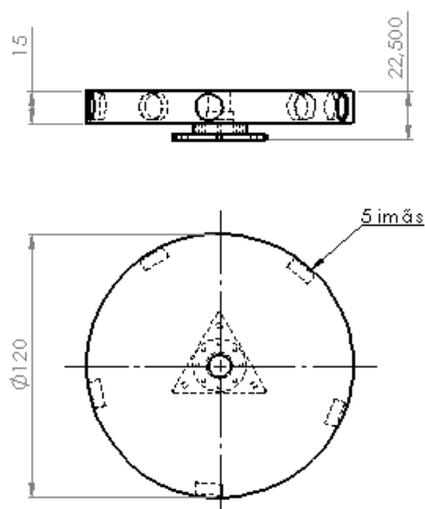


Figura 4.1 – Desenho mostrando o primeiro modelo desenvolvido, Software SolidWorks®.

Com uma ação manual do ímã forçante (injetor) ao rotor, figura 4.2, de modo síncrono, fazendo-se movimento alternativo de aproximação/afastamento lento de pequena amplitude, obteve-se o movimento rotatório com este modelo.

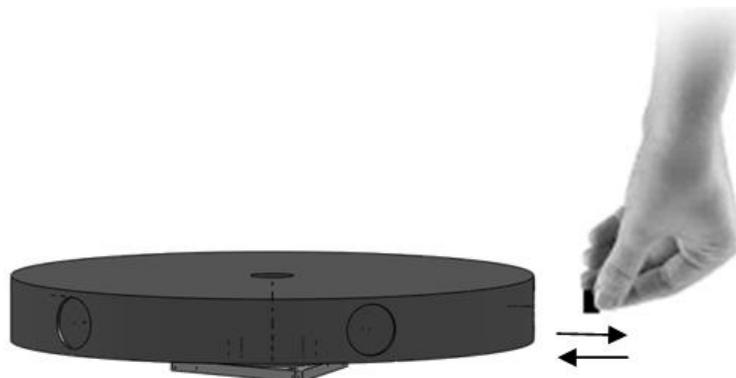


Figura 4.2 – Ação manual para movimentar o rotor, Software SolidWorks®.

Enquanto o rotor gira, o ímã que está na mão deverá ter um movimento de aproximação e afastamento a cada passagem do ímã do rotor. Apesar de que a amplitude desse movimento seja muito pequena, ao parar o movimento manual alternativo do ímã injetor no local mais aproximado do rotor, o movimento giratório tende a parar, pois o ímã injetor faz uma ação de repulsão para o lado contrário quando o outro ímã do rotor se aproxima, não conseguindo dar continuidade ao movimento.

A proposta seguinte seria de colocar um movimento de afastamento/aproximação do ímã do injetor no próprio elemento que o suportaria, permitindo a entrada do próximo ímã do rotor que estaria chegando, e assim obter uma nova repulsão.

## 4.2. Segundo modelo

Para desenvolver o segundo modelo, foram analisados vários desenhos de patentes, idealizado um modelo alternativo, desenhado o modelo geométrico em software CAD e construído em madeira. O material foi escolhido com base na premissa de que ele não iria interagir com as forças do campo magnético.

Com o primeiro modelo, observou-se que era necessário idealizar uma maneira de posicionar o injetor dotando-o de movimento próprio, de modo que, após a ação de repulsão do imã do rotor, o imã seguinte pudesse fazer sua entrada e receber do injetor a mesma ação do imã anterior, depois o terceiro imã, e assim por diante, mantendo o movimento.

Para desenvolver o segundo modelo de rotor utilizou-se como matéria prima também a madeira, construindo-se uma roda dentada com diâmetro de 270 mm e 15 mm de espessura, dotada de 5 dentes com 50 mm de altura, montada em um eixo horizontal com rolamento, conforme figura 4.3.

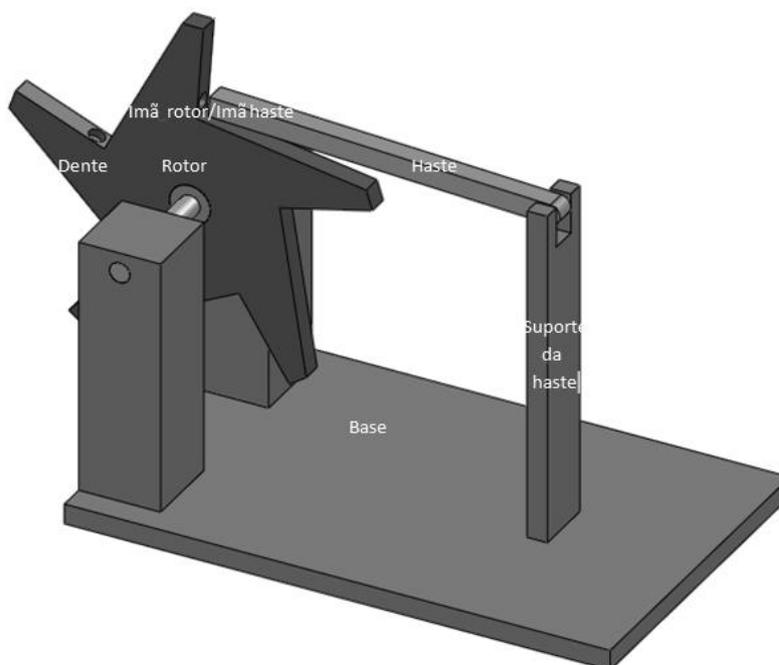


Figura 4.3 – Desenho do segundo modelo, Software SolidWorks®.

Neste modelo, o movimento giratório ocorreria através da repulsão dos imãs sempre que a haste injetora caísse por gravidade do dente atual, estando ele em uma posição superior. Os imãs do rotor foram posicionados no fundo de cada dente. O valor da altura do dente para esse modelo seria dimensionado com base na força magnética dos imãs escolhidos, de modo que, para 50 mm, a interação do campo magnético estivesse minimizada. A haste com o imã injetor em sua extremidade empurraria o rotor, fazendo-a

novamente subir pelo dente para poder entrar o próximo imã e cair neste dente, repetindo, assim, a ação.

Analisando a ação deste rotor, observa-se que a altura do suporte da haste tem uma importante função, devendo estar no nível superior do dente, para não exigir muito esforço para sua elevação pelo rotor, causando um aumento de resistência. Este modelo apresentou como dificuldade o fato de que o tamanho dos dentes do rotor causa uma grande amplitude de movimento da haste, de modo que a força de repulsão aplicada não tem magnitude suficiente para concluir a rotação de 72 graus de cada estágio, não sendo possível sua diminuição, pois haveria a interação entre os imãs da haste e o imã seguinte do rotor que estaria se aproximando.

### 4.3. Terceiro modelo

Em face da dificuldade operacional de acionamento com o rotor na vertical, o modelo 03 retorna à concepção de rotor na posição horizontal (figura 4.4), tentando estabelecer o movimento do imã do injetor na própria haste que o suporta. Para o acionamento do sistema foi conjugado um came na parte inferior do rotor e uma mola na extremidade da haste injetora, de modo a simular o acionamento manual do modelo 01 com a amplitude de movimento de aproximação/afastamento do injetor minimizada.

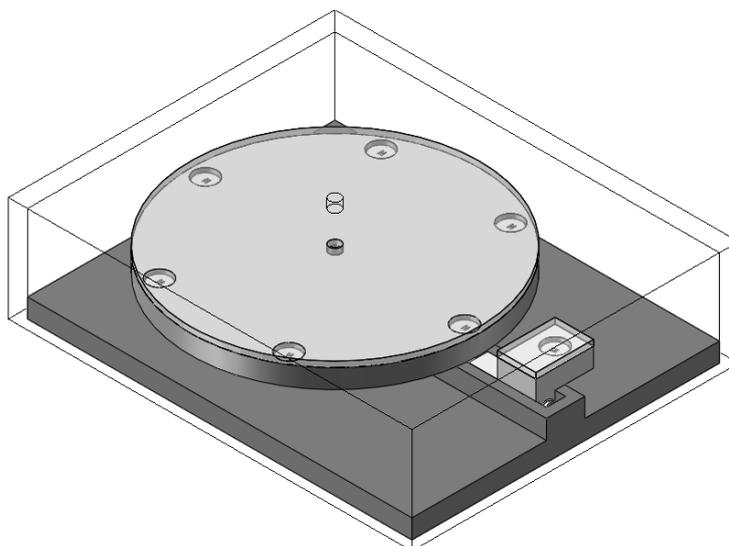


Figura 4.4 – Desenho esquemático do terceiro modelo, Software SolidWorks®.

No desenvolvimento deste modelo, desenhou-se sua geometria em software CAD, tendo a madeira como proposta de material para o rotor. Nessa concepção considerou 06 ímãs permanentes igualmente espaçados no rotor e um no injetor, conforme figura 4.5.

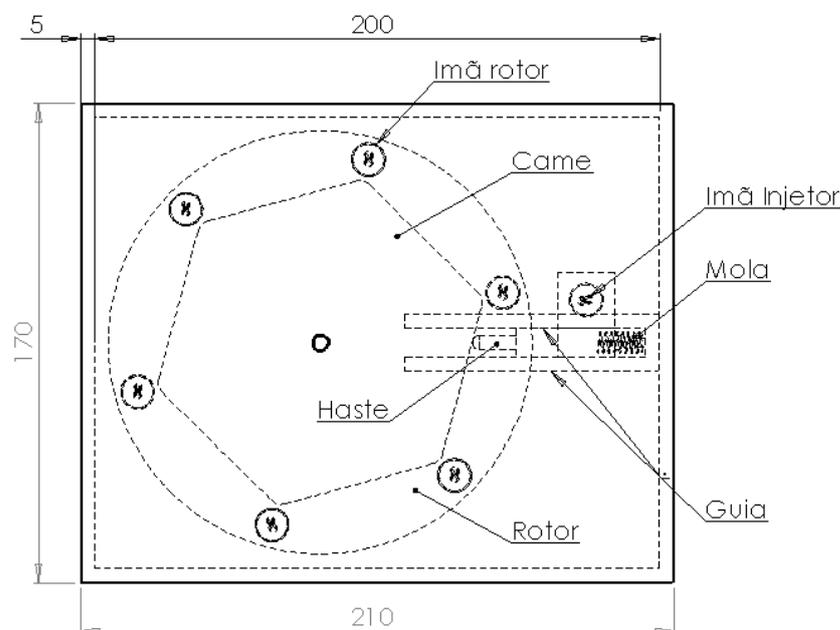


Figura 4.5 – Vista superior do terceiro modelo, Software SolidWorks®.

Neste formato, a haste na posição horizontal desliza em um guia, encostando-se a um came que se situa por baixo do disco do rotor próximo ao eixo, com uma mola na outra extremidade para auxiliar a entrada da haste no came. Quando esta entrada da haste é feita no came, o ímã do injetor está em uma posição de maior força com o ímã do rotor forçando sua rotação. Logo em seguida, a haste é empurrada para fora do centro, de modo a facilitar a passagem do próximo ímã do rotor, objetivando com este movimento iniciar uma nova ação.

Em uma análise mais avançada dessa concepção, entende-se que a força da mola poderia ser um obstáculo para o movimento do rotor, pois ela demanda uma determinada força para empurrá-lo; no entanto, atua com grande intensidade no momento do came empurrar a haste para fora, causando assim uma resistência importante para continuação do movimento rotativo.

#### 4.4. Quarto modelo

Das considerações realizadas no modelo 03, optou-se pela eliminação da mola, retornando-se ao de ação gravitacional. Neste modelo 04, tentou-se idealizar o movimento ascendente do injetor a partir de um batente no rotor, fazendo com que o imã do rotor que está em aproximação possa passar pelo imã do injetor e depois, por gravidade, executar um movimento descendente, efetuando a repulsão. Outra condição de melhoria em relação ao modelo anterior é a possibilidade de se utilizar mais de um imã injetor atuando em conjunto.

Nesta etapa do desenvolvimento experimental dos modelos buscou-se encontrar a geometria e um material ferromagnético de grande permeabilidade, para enfraquecer o campo magnético entre os polos dos ímãs (sul) do injeto e do rotor. Como o campo magnético tem preferência de transitar internamente em um material ferromagnético permeável, a força do campo magnético é reduzida, diminuindo assim sua amplitude no espaço aéreo e servindo como isolante magnético. Nesta situação, o outro polo (norte) ficaria com a ação normal do campo magnético. O material utilizado para fazer o isolamento foi inicialmente experimentado na prática e depois testado em aplicação de raios-X para determinar seu tipo e sua composição química, conforme apresentado no item 3.2 deste capítulo.

Resolvida a condição de isolamento do campo magnético de um polo do ímã permanente, necessitava-se ainda de um controle sobre o ímã injetor no que diz respeito ao posicionamento e a mobilidade, configurando um balanço para facilitar ainda mais a entrada dos ímãs do rotor (figura 4.6). Neste caso, o modelo foi construído em nylon, com o rotor medindo 270 mm com dois injetores defasados de 180 graus.

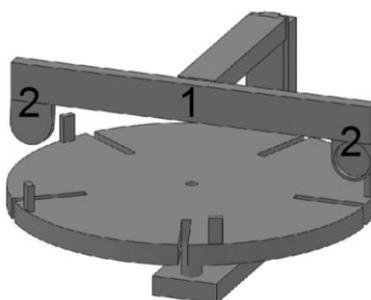


Figura 4.6 Esquema da concepção do quarto modelo, Software SolidWorks®.

Este modelo se caracteriza por dar mobilidade de balanço ao suporte dos injetores, em que, na medida do movimento do rotor, os batentes localizados na posição de cada ima do rotor irão tocando no suporte do injetor e levantando-os para trás, de modo a facilitar a passagem desse sobre o imã do rotor, caindo em seguida e fornecendo força de repulsão, dando movimento ao rotor.

Analisando-se experimentalmente este modelo, observou-se a dificuldade do rotor ultrapassar o batente com a força de repulsão do imã, mesmo auxiliado pela inércia como também pela ação da blindagem utilizada em cada imã. Quando há uma repulsão entre os imãs, a força não é suficiente para ultrapassar o batente e conseqüentemente fazer nova repulsão em um próximo imã do rotor.

## 4.5. Protótipo final

Dentre todos os modelos de concepções estudadas e analisadas, chegou-se a um protótipo considerado como final, o qual, pela grande mobilidade oferecida ao posicionamento do sistema injetor, permitiria em tese se testar várias possibilidades para obtenção do movimento pretendido.

Para fazer com que a força resultante magnética seja mais forte, os imãs injetores revezam em sua ação de repulsão. Quando um injetor está em posição de ação de repulsão, o outro está passando pelo imã, e assim cada imã do injetor tem uma função momentânea diferenciada.

O protótipo final, conforme figura 4.7, foi construído em nylon, com um rotor de diâmetro 270 mm e 09 imãs dispostos na periferia do rotor, distanciados a 40° um do outro. Cada imã com um isolante magnético no seu polo sul, de modo que o campo magnético induzido tenha como direção dominante a do polo norte.

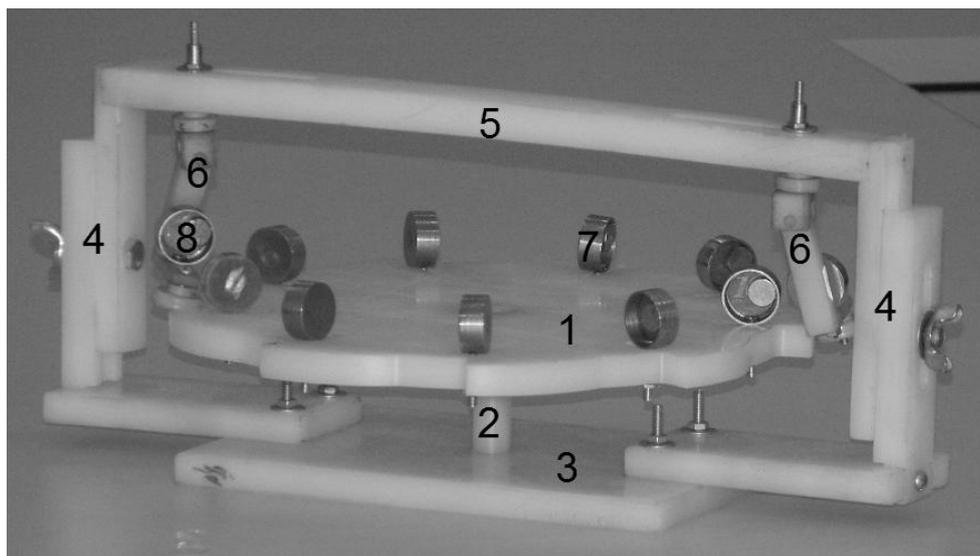


Figura 4.7 – Fotografia do protótipo Final.

O engenho consiste em um rotor (1) apoiado por rolamento de esfera em um eixo (2) que é fixado na base (3). Na base há também um suporte com altura regulável (4) para determinar a melhor altura do imã do injetor sobre os imãs do rotor, onde é fixada a haste (5) que sustenta dois suportes do injetor (6). No rotor há nove imãs com seus isolantes (7) igualmente espaçados em uma distância de  $40^\circ$  na periferia do rotor. No suporte do injetor (6), com mobilidade radial em função de sua fixação, há também um imã com seu isolante (8) (imã injetor).

O objetivo deste mecanismo é de realizar movimento rotativo no rotor a partir da repulsão entre dois imãs que estão com seus polos norte em aproximação. Após esta repulsão, o desenho da periferia do rotor causaria uma força radial centrífuga no suporte do injetor (detalhado na figura 4.8), afastando o imã do injetor do imã do rotor, fazendo com que este fique em posição de aproximação entre polos, de modo a propiciar o surgimento sequencial de uma nova força repulsiva.

O suporte do injetor, figura 4.8, tem uma mobilidade de  $360^\circ$  ajustada no elemento fixador (1); além disso, possui também uma mobilidade lateral para a regulagem da distância com o rotor.

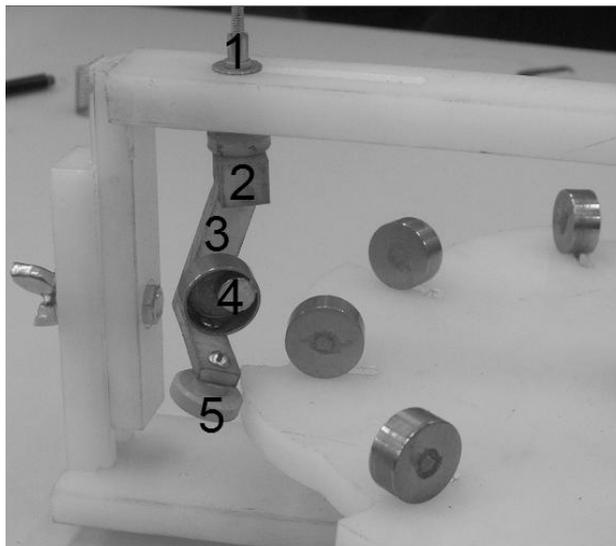


Figura 4.8 – Detalhe do conjunto injetor e sua interação com o rotor.

Acoplado a este, há um elemento de articulação (2) que permite um movimento livre na lateral, facilitando o afastamento do conjunto do injetor no momento de entrada do ímã do rotor para iniciar uma nova repulsão. A geometria do suporte em forma de L (3) faz com que exista uma distância entre o injetor (ímã e isolante) (4) e o rolete (5) que desliza na lateral do rotor, facilitando tanto o atrito como controlando o momento exato de ocorrer a maior impulsão da força de repulsão dos ímãs.

## CAPÍTULO 5

### 5. Análises Mecânicas

Foram elaboradas dois tipos de análises, a primeira foi a análise a global ou energética baseada na lei da conservação de energia; a segunda análise focalizou a análise local que foi baseada nos balanços das forças e de seus momentos envolvidos (torques).

#### 5.1. Análise Global

##### 5.1.1. Lei da Conservação da Energia.

A primeira lei da termodinâmica é um enunciado da conservação da energia para um sistema.

$$\delta Q - \delta W = dE, \quad (5.1)$$

A equação 5.1, pode ser escrita na forma de taxas como,

$$\left( \dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt} \right)_{\text{SISTEMA}}, \quad (5.2)$$

Na equação 5.2, a convenção de sinais adotada é uma herança da primeira aplicação tecnológica desses conceitos: a máquina térmica. Uma máquina térmica produz trabalho a partir do consumo de calor, ou seja, é um sistema em que entra calor e do qual sai trabalho, (GIORGETTI, 2008). Sendo assim, a taxa de transferência de calor  $\dot{Q}$ , é positiva quando o calor é adicionado ao sistema pelo meio que o envolve e a taxa de transferência de trabalho  $\dot{W}$ , é positiva quando o trabalho é realizado pelo sistema sobre o meio. Na mesma

equação a energia total do sistema pode ser obtida por integração na base de massas ou de volumes diferenciais: (FOX, 2010).

$$E_{\text{sistema}} = \int_{M(\text{SISTEMA})} e dm = \int_{\forall(\text{SISTEMA})} e \rho dV, \quad (5.3)$$

$$e, e = u + \frac{V^2}{2} + gz, \quad (5.4)$$

onde,  $e$  é a energia intensiva do sistema,  $u$  é a energia interna intensiva,  $V$  é a velocidade e  $z$  é a altura relativa a uma referencia de uma partícula de substancia de massa  $dm$ .

Assim é possível ter-se um enunciado da primeira lei da termodinâmica: a variação de energia interna  $\Delta E$  de um sistema é igual à diferença entre o fluxo de calor  $\dot{Q}$  trocado com o meio externo e a taxa de trabalho  $\dot{W}$  desenvolvida durante a transformação.

Para poder aplicar esses conceitos numa análise global do sistema em estudo neste trabalho é necessário inicialmente se elaborar um esquema do sistema envolvido no processo, ver figura 5.1.

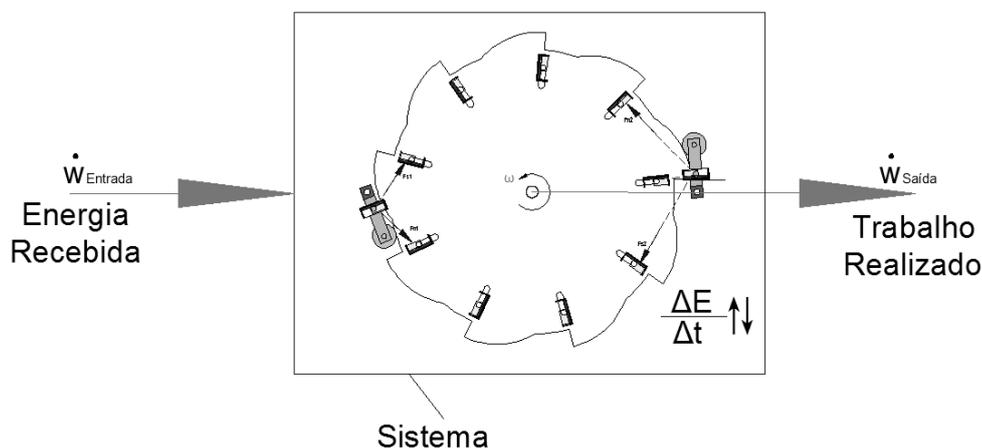


Figura 5.1 – Modelagem do sistema para análise pela primeira lei da termodinâmica na partida.

No caso em análise,  $\dot{W}_{Entrada}$  seria uma taxa de energia inicial aplicada (força aplicada x velocidade induzida no rotor = trabalho de entrada) por um agente externo na periferia do rotor, que seria transformada em torque de partida para o eixo. Nesse caso a evolução do trabalho realizado  $\dot{W}_{Saída}$ , seria o produto da velocidade angular do rotor pelo

torque no eixo. Como o sistema apresenta resistências mecânicas (mancal e roletes) e aerodinâmicas (resistência do ar), tanto a velocidade angular como o torque inicial iria diminuir progressivamente tendendo a dissipar a taxa de energia inicial de entrada  $\dot{W}_{Entrada}$ , no sistema.

Portanto, sob a análise da primeira lei, a condição para haver manutenção de movimento do aparato é que se promova algum tipo de interação entre forças magnéticas dos ímãs do rotor e injetor de modo a resultar numa sequencia de impulsos motrizes para o rotor. Para essa condição ser possível sob uma análise mecânica pela primeira lei, teria de haver uma variação na energia interna total do sistema, variação de energia por variação de tempo, para poder explicar o impulso motriz sequencial a ser obtido com um dado modelo de rotor magneto. Isso significa que deveria haver uma diminuição na energia magnética dos ímãs que compõe o engenho rotor/injetor para manter a entrega de potencia mecânica na forma de torque de eixo e rotação do rotor, figura 5.2.

$$\left( \frac{\Delta E}{\Delta t} = -\frac{W}{\Delta t} = -\dot{W}_{Saída} \right), \quad (5.5)$$

Esse argumento conflita com o conceito de imas permanentes que em tese, manteria o poder do seu campo magnético de modo infinito, pois se um trabalho é produzido sobre um sistema e o seu estado energético não se altera, necessariamente deve sair do mesmo, uma quantidade equivalente de trabalho para o exterior.

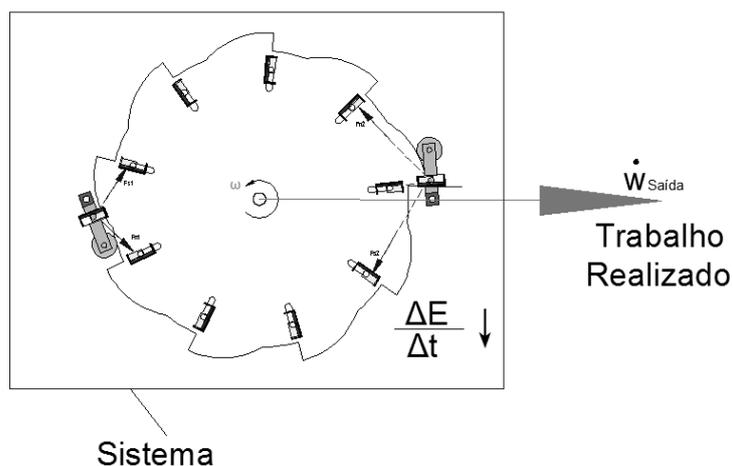


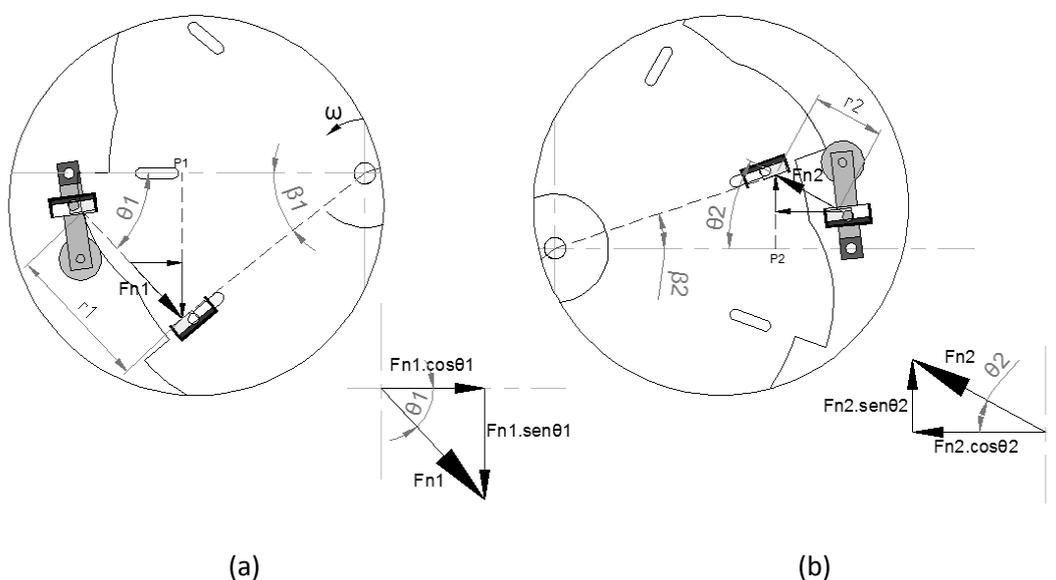
Figura 5.2 – Modelagem do sistema para análise pela primeira lei da termodinâmica após a partida.



Tabela 5.1 – Representações usadas na figura 6.3.

LEGENDA	
<b>A</b>	Imãs de neodímio NeFeB - Ø12 x 5.
<b>B</b>	Material isolante Aço 430 – Ø20 x 2.
<b>C</b>	Material Isolante Aço 1020 – Ø23 x 9, com uma cavidade circular.
<b>D</b>	Suporte para fixação do imã injetor da força.

Para se efetuar o estudo, procede-se a esquematização do aparato num certo instante de tempo. Para fins de análise consideram-se em separado as ações de cada imã injetor em relação ao imã do rotor, conforme mostrado na figura 5.4 (a) e (b), onde aquelas ações estão representadas como  $F_{n1}$  e  $F_{n2}$  (forças associadas ao polo norte dos imãs).

Figura 5.4 – Esquema instantâneo da análise da decomposição de forças em (a) $F_{n1}$  e (b) $F_{n2}$ .

Decompondo-se as forças  $F_{n1}$  e  $F_{n2}$  obtêm-se para o torque magnético instantâneo as seguintes equações, onde o primeiro índice dos torques refere-se ao injetor e o segundo índice refere-se às componentes de força:

$$\tau_{11} = F_{n1} \sin \theta_1 \cdot d \cos \beta_1$$

$$\tau_{21} = F_{n2} \sin \theta_2 \cdot d \cos \beta_2$$

$$\tau_{12} = F_{n1} \cos \theta_1 \cdot d \sin \beta_1$$

$$\tau_{22} = F_{n2} \cos \theta_2 \cdot d \sin \beta_2$$

Para se obter o torque resultante instantâneo faz-se o somatório dos torques anteriores.

$$\tau_{res} = \sum \tau = \tau_{11} + \tau_{12} + \tau_{21} + \tau_{22}, \quad (5.6)$$

Substituindo os valores dos  $\tau$  tem-se:

$$\begin{aligned} \tau_{res} &= F_{n1} \text{sen} \theta_1 \cdot d \cos \beta_1 + F_{n1} \cos \theta_1 \cdot d \text{sen} \beta_1 + F_{n2} \text{sen} \theta_2 \cdot d \cos \beta_2 + F_{n2} \cos \theta_2 \cdot d \text{sen} \beta_2 \\ \tau_{res} &= F_{n1} d (\text{sen} \theta_1 \cdot \cos \beta_1 + \cos \theta_1 \cdot \text{sen} \beta_1) + F_{n2} d (\text{sen} \theta_2 \cdot \cos \beta_2 + \cos \theta_2 \cdot \text{sen} \beta_2), \end{aligned} \quad (5.7)$$

Considerando-se  $p$  e  $p'$  dois polos magnéticos separados por uma distância  $r$ ; a força exercida entre eles tem por valor, conforme equação 2.5,  $F_n = k \frac{pp'}{r^2}$ , então a equação 4.6, resulta em:

$$\begin{aligned} \tau_{res} &= k \frac{pp'}{r_1^2} d (\text{sen} \theta_1 \cdot \cos \beta_1 + \cos \theta_1 \cdot \text{sen} \beta_1) + k \frac{pp'}{r_2^2} d (\text{sen} \theta_2 \cdot \cos \beta_2 + \cos \theta_2 \cdot \text{sen} \beta_2) \\ \tau_{res} &= k \frac{pp'}{r_1^2} d (\text{sen} \theta_1 \cdot \cos \beta_1 + \cos \theta_1 \cdot \text{sen} \beta_1) + k \frac{pp'}{r_2^2} d (\text{sen} \theta_2 \cdot \cos \beta_2 + \cos \theta_2 \cdot \text{sen} \beta_2), \text{ ou} \\ \tau_{res} &= kpp' \cdot d \left[ \frac{1}{r_1^2} (\text{sen} \theta_1 \cdot \cos \beta_1 + \cos \theta_1 \cdot \text{sen} \beta_1) + \frac{1}{r_2^2} (\text{sen} \theta_2 \cdot \cos \beta_2 + \cos \theta_2 \cdot \text{sen} \beta_2) \right], \end{aligned} \quad (5.8)$$

Dos resultados experimentais  $kpp' = 0,0004 \left( \frac{N}{m^2} \right)$ , da geometria do rotor  $d = 0,109(m)$ , então  $kpp' d = 4,36 \times 10^{-5} (N \cdot m^3)$ .

A geometria de projeto do protótipo de rotor considera uma divisão em nove setores angulares de 40 graus, sendo fixado um ímã, na periferia de cada setor do rotor, conforme figura 5.5.

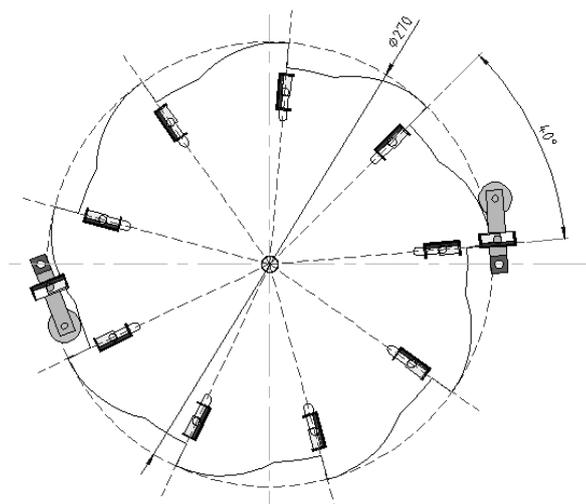


Figura 5.5 – Esquema da geometria do rotor.

Os imãs injetores são defasados de 180 graus e são fixados em seu suporte que desliza sobre um rolete na lateral do rotor. O suporte do injetor tem um considerável grau de liberdade para poder fazer um movimento lateral. Na medida em que seja empurrado pelo rotor, ele se afasta do imã do rotor que está se aproximando, facilitando seu posicionamento inicial do ciclo, visando um novo ciclo motriz de 40 graus no rotor.

No procedimento para os cálculos desenvolvidos neste trabalho foram analisadas as configurações de força e geometria a cada 5 graus no ciclo de 40 graus. Dessa análise observou-se ser necessário apenas calcular as forças em quatro dessas oito posições, pois se constatou repetições de configuração de geometria defasadas de 180 graus, conforme ilustra a figura 5.6.

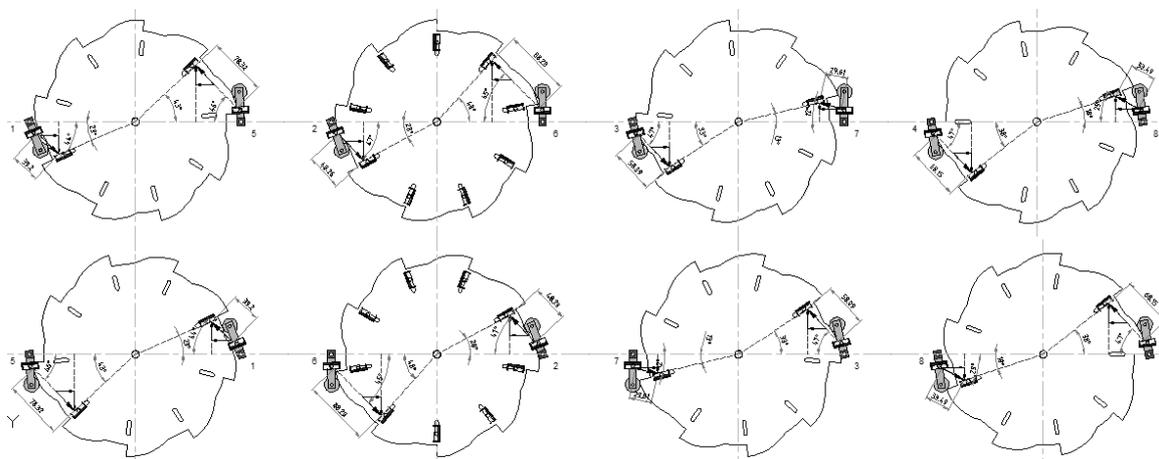


Figura 5.6 – Esquema das configurações que se repetem no ciclo de 40 graus.

Da figura 3.7, constata-se que a função característica das forças dos imãs em uso é  $F_n = \frac{0,0004}{r^{1,814}}$ . Comparando-se com a equação 2.5, obtém-se que  $kpp' = 0,0004$ .

De acordo com os dados do experimento de força do imã (capítulo 3), tem-se para  $r = 0,006(m) \Leftrightarrow F_n = 4,29(N)$ , calcula-se então o valor de  $pp'$ :

$$kpp' = 0,0004 \therefore pp' \frac{0,0004}{k} = \frac{0,0004}{10^{-7}} = 4000$$

$$\text{Ou, } pp' = \frac{F_n \cdot r^{1,814}}{k} = \frac{4,29 \cdot 0,006^{1,814}}{10^{-7}} = \frac{4,29 \cdot 9,32 \times 10^{-5}}{10^{-7}} = \frac{3,99 \times 10^{-4}}{10^{-7}} = 3999,66.$$

Como os imãs são iguais tem-se  $p = p'$ , então  $p^2 = 4000(A^2 \cdot m^2)$ , onde  $p = \sqrt{4000(A^2 \cdot m^2)}$ , o valor do polo do imã é  $p = 63,24(A \cdot m)$ .

Para calcular o torque resultante aplicado, pela equação 4.7, os parâmetros para o protótipo em teste são  $kpp' = 0,0004 \left( \frac{N}{m^2} \right)$ , e  $d = 0,109(m)$ , então  $kpp'd = 4,36 \times 10^{-5} (N/m)$ .

## 5.2.2. Cálculo das forças magnéticas motoras

Detalham-se a seguir as quatro posições apresentadas para cálculo das forças resultantes magnéticas motoras.

### 5.2.2.1. Simulação da posição 1.

Para o cálculo na primeira posição, figura 5.7, detalha-se o arranjo e os valores das variáveis envolvidas.

Com esse resultado do torque resultante instantâneo (para essa posição), pode-se estimar o valor da força ( $F$ ) capaz de produzir o mesmo torque no rotor.

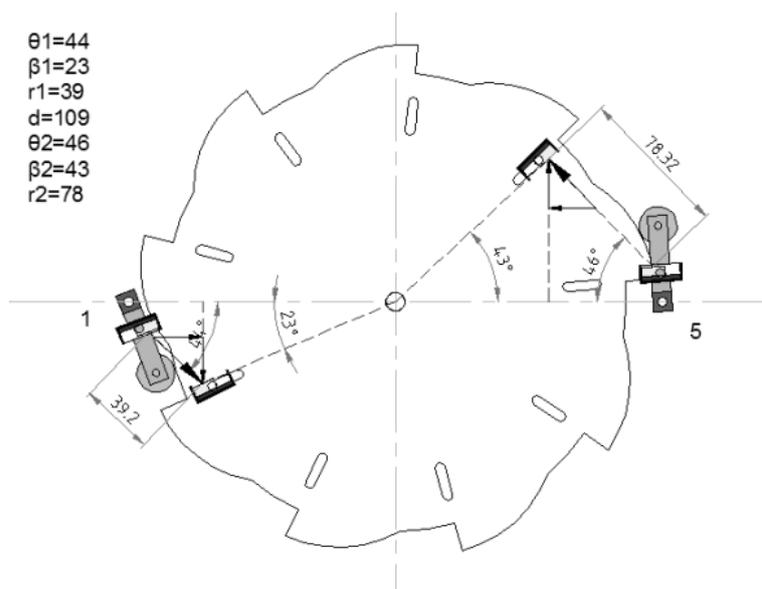


Figura 5.7 – Primeira posição para cálculo de torque resultante

Aplicando-se a equação 5.8, para esta posição vem:

$$\tau_{res} = kpp'.d \left[ \frac{1}{r_1^{1,814}} (\text{sen } \theta_1 \cdot \cos \beta_1 + \cos \theta_1 \cdot \text{sen } \beta_1) + \frac{1}{r_2^{1,814}} (\text{sen } \theta_2 \cdot \cos \beta_2 + \cos \theta_2 \cdot \text{sen } \beta_2) \right]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 \left[ \frac{1}{39^{1,814}} (\text{sen } 44 \cdot \cos 23 + \cos 44 \cdot \text{sen } 23) + \frac{1}{78^{1,814}} (\text{sen } 46 \cdot \cos 43 + \cos 46 \cdot \text{sen } 43) \right]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 \left[ \frac{1}{769,47} (0,69 \cdot 0,92 + 0,72 \cdot 0,39) + \frac{1}{2705,57} (0,72 \cdot 0,73 + 0,69 \cdot 0,68) \right]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 [0,0012(0,63 + 0,28) + 0,00036(0,52 + 0,47)]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 [0,0012(0,91) + 0,00036(0,99)]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 [0,0010 + 0,00035] \therefore \tau_{res} = 12582,96 \times 0,0014 \therefore \tau_{res} = 17,62 (\text{mm.N})$$

Com esse resultado do torque resultante instantâneo (para essa posição), pode-se estimar o valor da força fictícia ( $F$ ) capaz de produzir o mesmo torque no rotor.

$$\tau_{res} = d.F \therefore F = 0,16N$$

### 5.2.2.2. Simulação da posição 2.

Para o cálculo na segunda posição, figura 5.8, detalha-se o arranjo e os valores das variáveis envolvidas.

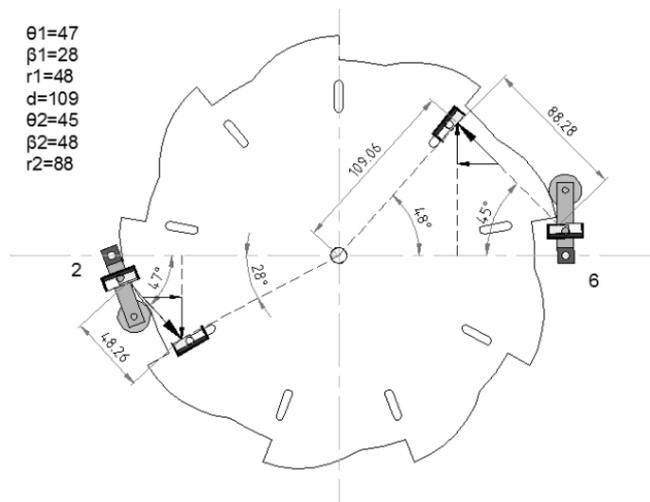


Figura 5.8 – Segunda posição para cálculo do torque resultante

$$\tau_{res} = kpp'.d \left[ \frac{1}{r_1^{1,814}} (\text{sen}\theta_1 \cdot \cos\beta_1 + \cos\theta_1 \cdot \text{sen}\beta_1) + \frac{1}{r_2^{1,814}} (\text{sen}\theta_2 \cdot \cos\beta_2 + \cos\theta_2 \cdot \text{sen}\beta_2) \right]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 \left[ \frac{1}{48^{1,814}} (\text{sen}47 \cdot \cos 28 + \cos 47 \cdot \text{sen}28) + \frac{1}{88^{1,814}} (\text{sen}45 \cdot \cos 48 + \cos 45 \cdot \text{sen}48) \right]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 \left[ \frac{1}{1121,42} (0,73 \cdot 0,88 + 0,68 \cdot 0,47) + \frac{1}{3367,37} (0,71 \cdot 0,67 + 0,71 \cdot 0,74) \right]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 [0,00089(0,64 + 0,32) + 0,00029(0,47 + 0,52)]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 [0,00089(0,96) + 0,00029(0,99)]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 [0,00085 + 0,00028] \therefore \tau_{res} = 12582,96 \times 0,0011 \therefore \tau_{res} = 13,84 (\text{mm.N})$$

Com esse resultado do torque resultante instantâneo (para essa posição), pode-se estimar o valor da força ( $F$ ) capaz de produzir o mesmo torque no rotor.

$$\vec{\tau}_{res} = d.F \therefore F = 0,13N$$

### 5.2.2.3. Simulação da posição 3.

Para o cálculo na terceira posição, figura 5.9, detalha-se o arranjo e os valores das variáveis envolvidas.

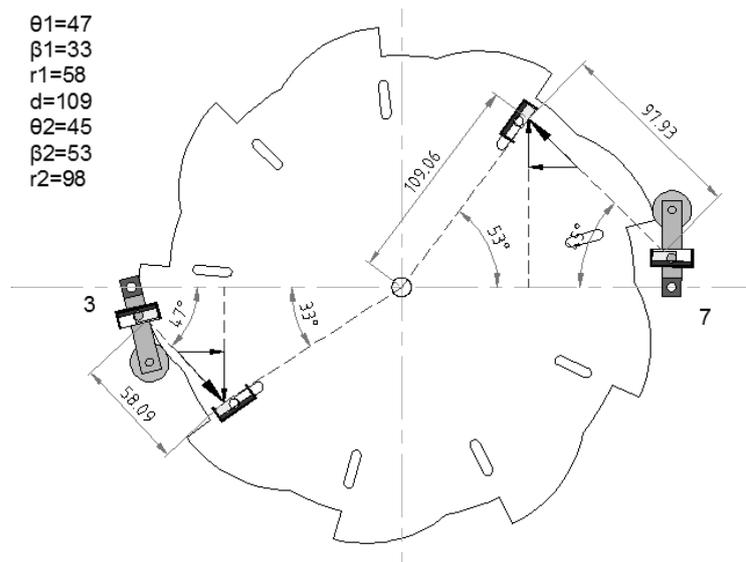


Figura 5.9 – Terceira posição para cálculo do torque resultante

$$\tau_{res} = kpp'.d \left[ \frac{1}{r_1^{1,814}} (\text{sen}\theta_1 \cdot \cos\beta_1 + \cos\theta_1 \cdot \text{sen}\beta_1) + \frac{1}{r_2^{1,814}} (\text{sen}\theta_2 \cdot \cos\beta_2 + \cos\theta_2 \cdot \text{sen}\beta_2) \right]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 \left[ \frac{1}{58^{1,814}} (\text{sen}47 \cdot \cos 33 + \cos 47 \cdot \text{sen}33) + \frac{1}{98^{1,814}} (\text{sen}45 \cdot \cos 53 + \cos 45 \cdot \text{sen}53) \right]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 \left[ \frac{1}{1580,73} (0,73 \cdot 0,84 + 0,68 \cdot 0,54) + \frac{1}{4493,39} (0,71 \cdot 0,60 + 0,71 \cdot 0,80) \right]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 [0,00063(0,61 + 0,37) + 0,00024(0,43 + 0,57)]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 [0,00063(0,98) + 0,00024(1)]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 [0,00061 + 0,00024] \therefore \tau_{res} = 12582,96 \times 0,00085 \therefore \tau_{res} = 10,69(\text{mm.N})$$

Com esse resultado do torque resultante instantâneo (para essa posição), pode-se estimar o valor da força ( $F$ ) capaz de produzir o mesmo torque no rotor.

$$\vec{\tau}_{res} = d.F \therefore F = 0,09N$$

### 5.2.2.4. Simulação da posição 4.

Para o cálculo na quarta posição, figura 5.10, detalha-se o arranjo e os valores das variáveis envolvidas.

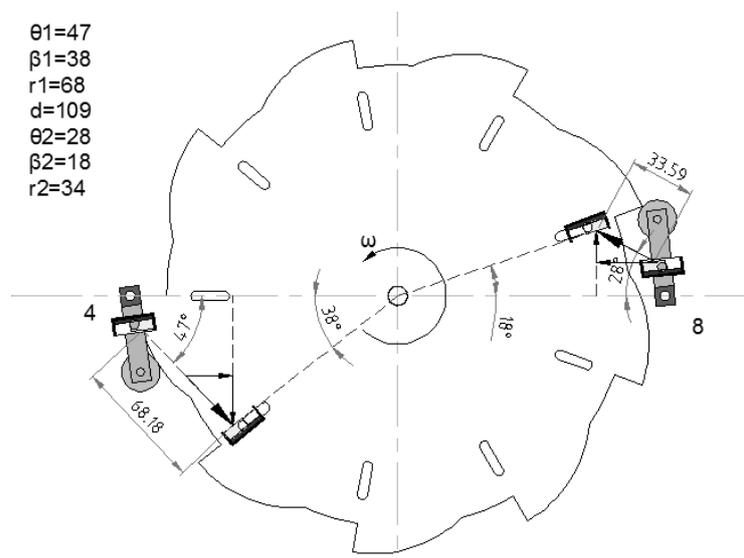


Figura 5.10 – Quarta posição para cálculo do torque resultante

$$\tau_{res} = kpp'.d \left[ \frac{1}{r_1^{1,814}} (\text{sen}\theta_1 \cdot \cos\beta_1 + \cos\theta_1 \cdot \text{sen}\beta_1) + \frac{1}{r_2^{1,814}} (\text{sen}\theta_2 \cdot \cos\beta_2 + \cos\theta_2 \cdot \text{sen}\beta_2) \right]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 \left[ \frac{1}{68^{1,814}} (\text{sen}47 \cdot \cos 38 + \cos 47 \cdot \text{sen}38) + \frac{1}{34^{1,814}} (\text{sen}28 \cdot \cos 18 + \cos 28 \cdot \text{sen}18) \right]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 \left[ \frac{1}{2109,45} (0,73 \cdot 0,78 + 0,68 \cdot 0,61) + \frac{1}{599,93} (0,46 \cdot 0,95 + 0,88 \cdot 0,30) \right]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 [0,00047(0,56 + 0,41) + 0,0016(0,43 + 0,26)]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 [0,00047(0,97) + 0,0016(0,69)]$$

$$\tau_{res} = 12582,96 [0,00045 + 0,0011] \therefore \tau_{res} = 12582,96 \times 0,0015 \therefore \tau_{res} = 19,50(\text{mm.N})$$

Com esse resultado do torque resultante instantâneo (para essa posição), pode-se estimar o valor da força ( $F$ ) capaz de produzir o mesmo torque no rotor.

$$\vec{\tau}_{res} = d.F \therefore F = 0,17N$$

### 5.2.2.5. Análise dos Resultados

A tabela 5.2, relaciona as variáveis geométricas, utilizadas para desenvolver os cálculos de força resultante, com cada instante escolhido para a modelagem.

Tabela 5.2 – Representação das forças calculadas em cada instante especificado diante dos ângulos e distâncias.

	F (gf)	$\theta 1$	$\beta 1$	r1	$\theta 2$	$\beta 2$	r2
Instante 01	16	44	23	39	46	43	78
Instante 02	13	47	28	48	45	48	88
Instante 03	9	47	33	58	45	53	98
Instante 04	17	47	38	68	28	18	34

### 5.2.3. Evolução das forças magnéticas resistivas.

Em face da blindagem inserida na parte posterior do ímã (polo sul), a força ( $F_{s1}$ ) do campo magnético neste polo fica com uma fraca ação, o que pode ser verificado por meio de manipulações utilizando os ímãs com o isolamento e simulações usando o software MAXWELL®, baseado no método de elemento finito (FEM). Na figura 5.11(a) tem-se a posição da ação (vetor) do campo magnético entre os polos sul, Na figura 5.11(b) tem-se o ímã posicionado dentro do material isolante.

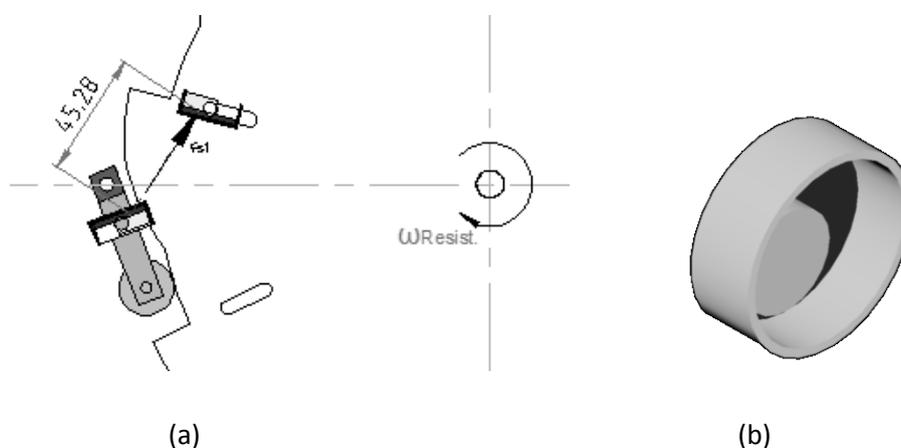


Figura 5.11 – Detalhe do efeito da blindagem na magnitude das forças resistivas.

(Legenda na tabela 4.1).

Observa-se que a força motriz atua no sentido anti-horário enquanto as resistivas, conforme representada na figura 5.11, atuam no sentido horário. Nas figuras 5.12 a 5.15, são representadas as forças resistivas no rotor/injetor e as respectivas simulações das linhas de fluxo do campo magnético, usando-se o software MAXWELL®.

Cada posição determinada para análise da força motriz magnética é também utilizada para simulação da força resistiva magnética no software MAXWELL®, conforme posição 1 da figura 5.12.

Desenhado a geometria dos elementos em análise o software apresenta a solução desejada depois de informada os materiais que o constitui. Uma malha adequada, eficiente e precisa é gerada automaticamente resolvendo o problema com mostra a figura 5.12.

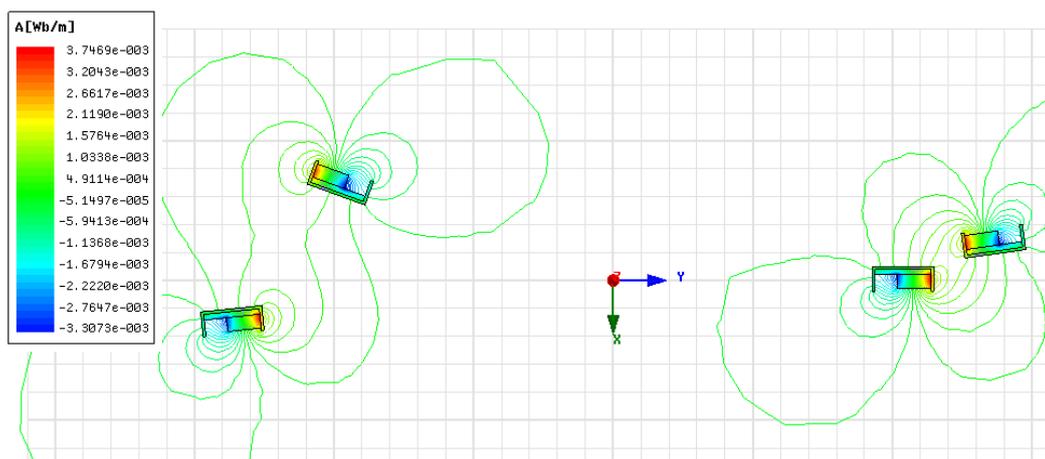


Figura 5.12 – Força magnética repulsiva na posição 01 e respectiva simulação, Software Maxwell®.

Neste caso, a relação de ação do campo magnético entre os polos do rotor e injetor que estão isolados são bastante enfraquecidos.

As figuras seguintes de 5.13 a 5.15 apresentam as situações de análise semelhante à figura 5.12 para as outras posições estratégicas em que também foram analisadas as forças motrizes magnéticas.

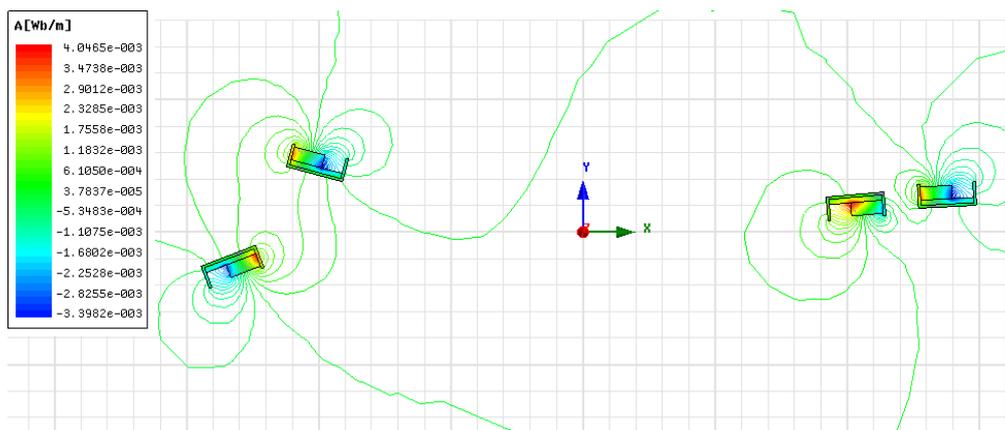


Figura 5.13 - Força magnética repulsiva na posição 02 e respectiva simulação, Software Maxwell®.

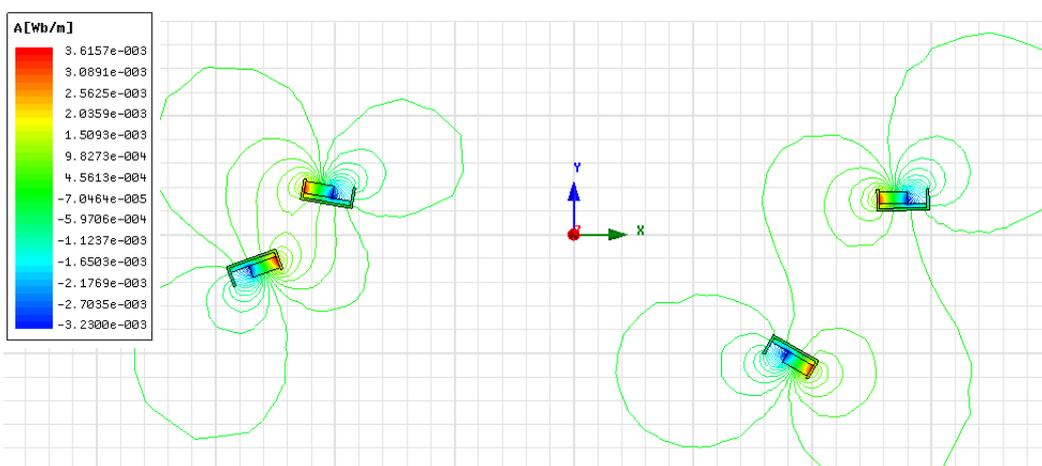


Figura 5.14 - Força magnética repulsiva na posição 03 e respectiva simulação, Software Maxwell®.

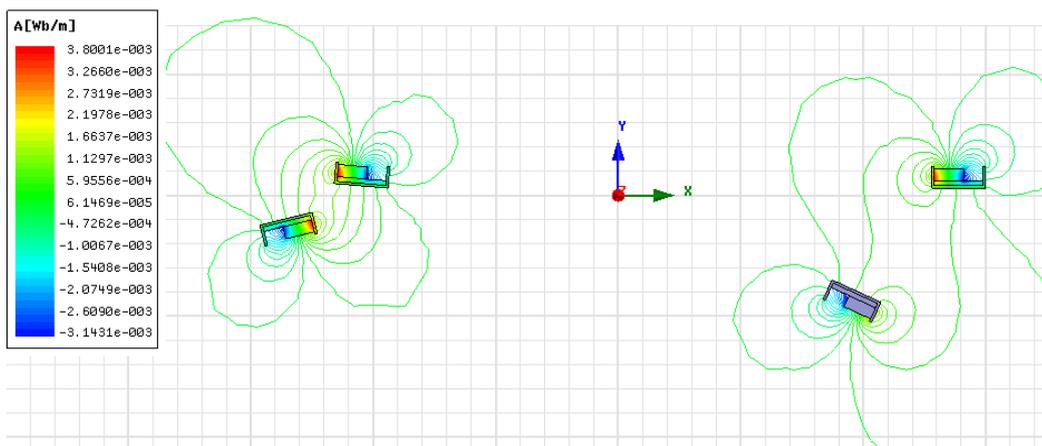


Figura 5.15 - Força magnética repulsiva na posição 04 e respectiva simulação, Software Maxwell®.

### 5.2.3.1. Análise dos Resultados

Dos resultados das simulações apresentadas nas figuras 5.12 a 5.15, constata-se que as linhas de fluxo magnético se concentram pelo material isolante utilizado que tem alta permeabilidade magnética, conforme identificado no item 3.2 deste trabalho. Em face desse resultado pode ser considerado em uma primeira análise que as forças magnéticas resistivas podem ser desprezadas.

### 5.2.4. Identificação da força de resistência mecânica.

#### 5.2.4.1. Metodologia experimental

Para quantificar principalmente as forças de resistência mecânica no protótipo (massa do rotor, atrito no mancal, atrito entre rolete e rotor e resistência do ar, como também caso ocorra, alguma resistência magnética) foi utilizado um dinamômetro modelo MAEY, figura 5.16, com escala faixa de indicação de zero a cem grama-força e resolução de um grama-força.



Figura 5.16 – Dinamômetro modelo MAEY utilizado no experimento.

O processo de medição consistiu em fixar uma linha entre um ponto na periferia do rotor parado e o dinamômetro, conforme ilustrado na figura 5.17. Fazendo-se a

seguir tração na linha através do dinamômetro e observando cuidadosamente o valor máximo atingido na escala, antes do início do deslocamento do rotor.

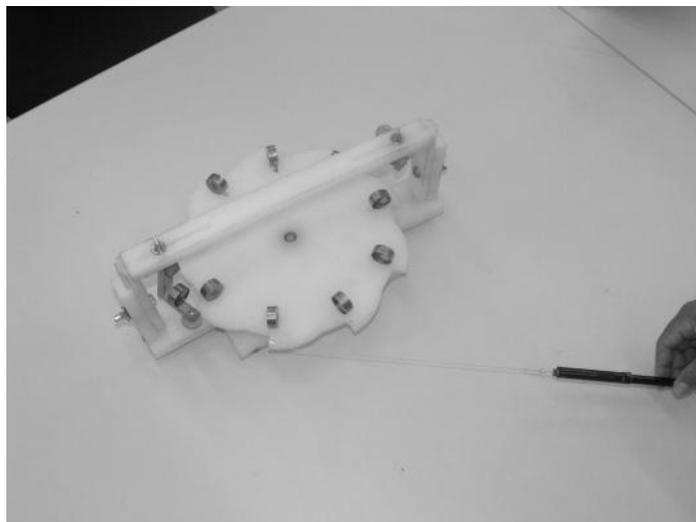


Figura 5.17 – Representação do processo de medição com dinamômetro.

No desenho esquemático da figura 5.18, demonstra o processo de medição das forças resistivas no protótipo.

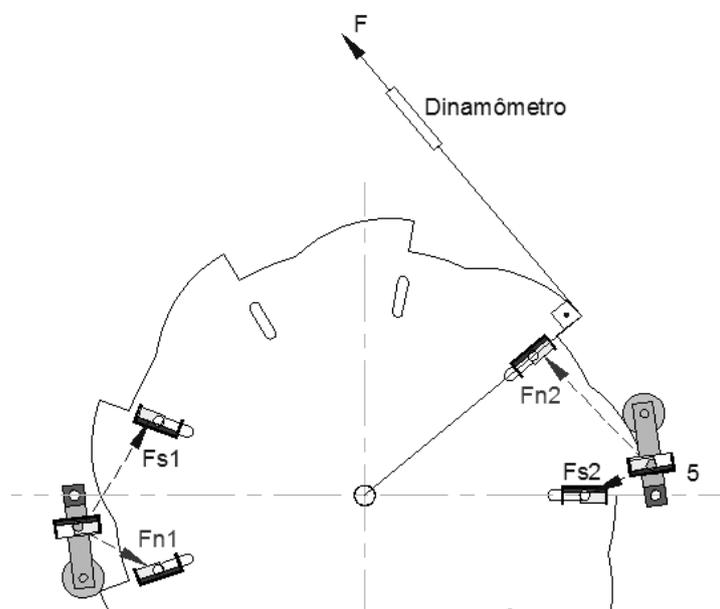


Figura 5.18 - Esquema de medição da resistência mecânica com dinamômetro.

O experimento consistiu na realização de dez ensaios para medidas de força, sempre aplicada tangencialmente ao rotor, conforme figura 5.18. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Força experimental e Torque resistivo no rotor.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F(gf)	9,0	8,0	9,0	9,0	8,5	9,5	9,5	9,0	9,0	9,5
F (N)	0,09	0,08	0,09	0,09	0,085	0,095	0,095	0,09	0,09	0,095

O resultado da medição da força a partir dos valores apresentado na tabela 5.3, foi realizado com os procedimentos do guia para expressão para incerteza da medição, (INMETRO, 2003). O valor final obtido foi  $F = [0,09 \pm 0,032]_{95} \text{ N}$ .

### 5.2.5. Análise mecânica local do balanço de forças

O rotor do protótipo tem um arranjo de nove ímãs igualmente espaçados a uma distância angular de 40 graus e a uma distancia radial de 109 mm, conforme figura 5.20. Os dois injetores são fixados no suporte que estão dispostos ao lado do rotor em posição diametral, defasado de 180 graus.

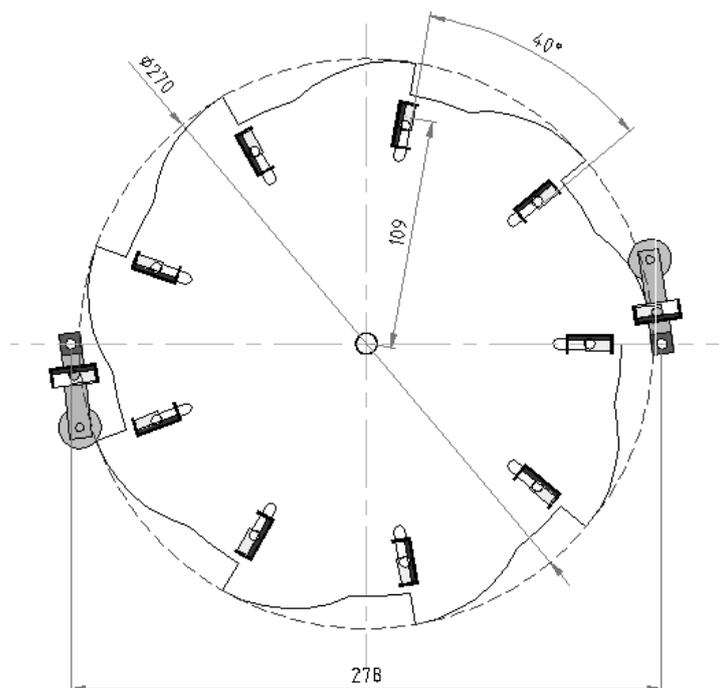


Figura 5.20 – Posicionamento e dimensões do arranjo de ímãs no protótipo.

O movimento cíclico é periódico no intervalo de 360 graus, com nove estágios para completar uma volta. Dentro de cada estágio de 40 graus, foi analisado sequencialmente 8 posições a cada 5 graus de avanço, que conforme indicado na figura 5.21, se observa que, após se calcular as primeiras 4 posições, elas são repetidas por razões de simetria do rotor.

Na análise geral do cálculo das forças motoras magnéticas resultantes ( $F_{n1}$  e  $F_{n2}$ ), encontram-se nas quatro posições apresentadas, os valores de 0.16, 0.13, 0.09 e 0.17 N respectivamente.

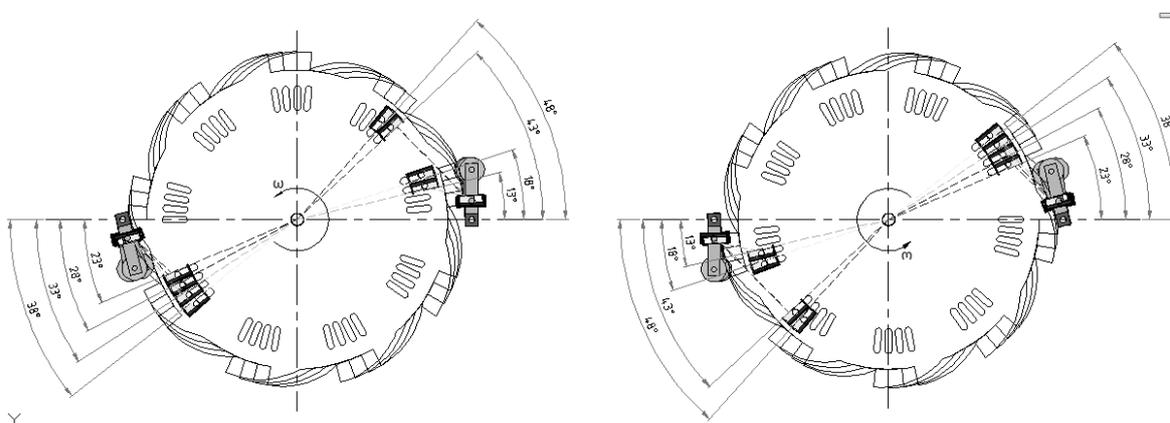


Figura 5.21 – Posições e valores das forças magnéticas motoras, repetição dentro dos quarenta graus.

Os valores resultantes das forças magnéticas resistivas ( $F_{s1}$  e  $F_{s2}$ ) foram considerados desprezíveis, pois com a blindagem, a ação do campo magnético diminui consideravelmente no espaço entre os ímãs do rotor e injetor, pois as linhas de fluxo tendem preferencialmente a movimentar-se pelo material isolante que tem grande permeabilidade magnética. Para se avaliar as forças mecânicas resistivas que atuam no mancal, no rolete do injetor, com a resistência do ar e da massa do rotor, foi realizado um teste experimental utilizando um dinamômetro e constatou-se uma força de aproximadamente 0,09 N.

Com essas informações, pode ser realizado o balanço de forças para o protótipo estudado, concluindo-se que:

- Pelos cálculos das forças magnéticas motoras (polo norte), ocorrem posições do conjunto rotor/injetor em que o valor considerado é de 0,09 N;
- Da análise das forças magnéticas resistivas (polo sul), obtidas com as simulações realizadas com o software Maxwell<sup>®</sup>, observa-se que o campo magnético fica

drasticamente reduzido, diante da blindagem com material permeável. Este resultado permite considerar essas forças desprezíveis no balanço;

- Do resultado do experimento das forças resistivas mecânicas, observou-se uma resultante de módulo aproximado a 0,09 N, valor numérico encontrado como mais provável diante das amostras obtidas;
- Para o balanço das forças envolvidas no processo, foi considerado como valor da força motriz resultante, a magnitude de 0,09 N, pois, na menor magnitude das posições analisadas a resultante assume esse valor. Conseqüentemente, para que o rotor mantenha movimento a força resultante resistiva deverá ser menor que 0,09 N. Nas posições em que a força resistiva resultante for igual à força motriz resultante, o rotor estaria instantaneamente em equilíbrio de forças, podendo ocorrer estado de equilíbrio estático (rotor parado) ou de movimento uniforme (rotor sem aceleração angular girando com velocidade angular constante).

## CAPÍTULO 6

### *6. Conclusões e Recomendações*

O desenvolvimento do protótipo de rotor magneto deste trabalho foi concebido a partir do estudo de modelos diversos com variações de forma, materiais e mecanismos de atuação, tendo como base de concepções, desenhos obtidos em bancos de dados de institutos oficiais de depósito de patentes. O protótipo final selecionado para servir como piloto para os estudos analíticos, baseou-se na concepção de rotor horizontal acionado com dois injetores, possibilitando um melhor balanceamento dos torques motores e com seu projeto prevendo graus de liberdade suficientes para permitir a maior mobilidade possível, de modo a obter o melhor posicionamento para a repulsão do ímã do injetor com os ímãs do rotor. A maior dificuldade do projeto é o de encontrar o posicionamento ideal entre injetor/rotor, de forma que o trabalho gerado da impulsão entre os ímãs seja de magnitude tal que, no momento do afastamento do injetor, o ímã do rotor passe na posição de máximo afastamento, de modo que os efeitos das resistências mecânicas sejam menores.

Os testes experimentais realizados serviram primeiramente para identificar as forças magnéticas dos ímãs selecionados e posteriormente para reconhecer a constituição dos elementos do material de blindagem utilizado. Na avaliação experimental da magnitude da força magnética, obteve-se a equação que rege a força entre os dois ímãs selecionados em função da distância que os separam. Ficou verificada uma coerência entre o modelo matemático e o resultado de medição da força.

Para o teste de reconhecimento do material da blindagem, foi utilizado o analisador portátil XRF da I NOVAC, que emprega o método de fluorescência de raios-X como ferramenta para Identificação Positiva de Materiais (PMI). De acordo com os

resultados obtidos no teste e a classificação da ASTM, identificou-se o material como um aço 430.

O estudo analítico desenvolvido neste trabalho se desmembrou em dois tipos clássicos de análise mecânica, a global ou energética, baseada na lei da conservação de energia, e a local, baseada nos balanços das forças e de seus momentos envolvidos. Da análise global, foi possível observar que para haver a manutenção da entrega de uma quantidade de trabalho pelo rotor (torque de eixo), necessariamente teria de haver variação (diminuição) do estado energético dos ímãs permanentes usados, tanto no rotor como nos injetores do protótipo analisado. Deve-se observar que a análise global efetuada neste trabalho não é usual em textos clássicos do âmbito da mecânica newtoniana; esse fato leva a se recomendar a realização de mais estudos fundamentais sobre o comportamento energético dos sistemas com ímãs permanentes.

Da análise mecânica local foram estimadas as forças motoras magnéticas em posições estratégicas identificadas com o emprego do software AutoCAD®, correspondente a quatro posições consecutivas a cada cinco graus, iniciando em qualquer ponto do rotor, pois, conforme análise geométrica, estas posições se repetem no decorrer de toda a circunferência do rotor. Para cada posição, identificou-se o posicionamento entre o ímã do rotor e o ímã do injetor, definindo-se a linha de ação da força resultante, decompondo-a em seguida, para o cálculo dos momentos (torques).

As forças resistivas magnéticas foram analisadas por meio de simulações com o emprego do software Maxwell®, resultando em forças de magnitudes desprezíveis em face do isolamento colocado na parte posterior do ímã, pois neste polo o campo magnético simulado apresentou indicativos de ter sua ação muito enfraquecida.

Para análise das forças resistivas mecânicas do protótipo final, foi planejado e realizado um experimento utilizando-se um dinamômetro para se medir a força necessária para vencer a inércia do rotor diante das resistências mecânicas existentes.

Com os resultados obtidos do estudo analítico local para o protótipo final de rotor magneto deste trabalho, foi possível constatar que as resultantes, tanto das forças motoras como das forças resistivas, magnéticas e mecânicas, apresentaram módulos

semelhantes, o que resultaria em um estado de equilíbrio de forças que favorece a estacionariedade do rotor.

Diante do confronto dos testes experimentais com o protótipo desenvolvido nesse trabalho e os resultados obtidos dos estudos analíticos, conclui-se que ele não apresentaria resultante motriz magnética capaz de manter condições de giro permanente por razões da ocorrência de outras resistências ou ações de campo magnético que não foram adequadamente modeladas e/ou computadas (aerodinâmicas, efeitos do campo magnético do sistema rotor/injetor, etc).

Em face da experiência prática adquirida e dos resultados analíticos obtidos durante o desenvolvimento deste estudo, pode-se apresentar como sugestões para futuros trabalhos, usando-se a tipologia de protótipo apresentado:

- Testar novos formatos do disco e o posicionamento de ímãs do rotor;
- Aperfeiçoar o dispositivo de fixação dos ímãs do injetor;
- Procurar obter maior redução das resistências por atrito;
- Validar as direções das forças motrizes oriundas da análise local com os campos magnéticos produzidos pelo sistema rotor/injetor.

## REFERÊNCIAS

COLEMAN, H. W., and W. W. STEELE. **Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers**. New York: Wiley, 1989.

HOLMAN, J. P. **Experimental Methods for Engineers**. 5<sup>th</sup> Ed. New York: McGraw, 1989.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7th ed, New York: JohnWiley & Sons Inc., 2007.

**Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**, Terceira edição em língua portuguesa – Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO, 120p, 2003.

CALLOWAY, ROBERT H. **Projects, Motor magnético**. 2002, em <http://www.callowayengines.com/msg24.htm>. Acesso em 13/01/2011.

Catálogo Técnico da **CIBAS – Imãs permanentes e dispositivos magnéticos**. Via Bisceglie, 91/7 - 20152 MILÃO-ITÁLIA [www.cibas.it](http://www.cibas.it) - E-mail: [cibas@cibas.it](mailto:cibas@cibas.it).

Catálogo Técnico. **Arcelor Mittal Inox Brasil**. Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações, Eng. Héctor Mario Carbó, Janeiro 2008, em <http://www.institutodoinox.com.br/site/pdf/aplicacaoeespecificacao.pdf>, acesso em 06/02/2011.

Dicionário de Física: **Conceito de Lei de Coulomb**. Disponível em: <http://www.knoow.net/cienciasexactas/fisica/coulombleide.htm> , Acesso em: 08/07/2010.

EDMINISTER, JOSEPH A. **Eletromagnetismo**. 2<sup>a</sup> Ed. Rio de Janeiro: Coleção Schaum, Editora Bookman, 352 p, 2006.

E-FÍSICA, Ensino de Física on line. <http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/>. Acesso em 18/08/2010.

FERRAZ, L. N. **Correntes de Foucault**. [http://www.feiradeciencias.com.br/sala13/13\\_32.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala13/13_32.asp). Acesso em 19/08/2009.

Força Elétrica. **Conceito de Força Elétrica**. Disponível em: <http://www.fisicadivertida.com.br/downloads/forcacampoepotencialeletrico.pdf>. Acesso em 08/07/2010.

FOX, R. W., PRITCHARD, P. J. e MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7ª Edição. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 710 p, 2010.

GIORGETTI, M. F. **Fundamentos de Fenômenos de Transporte para Estudantes de Engenharia**. São Carlos/SP: Suprema Editora Ltda, 512 p, 2008.

GONÇALVES, A. A. N. **Motor Magnético** INPI Pat. nº PI0704805 A, 07/2009.

GONÇALVES, C. S. **Montagem e construção de um magnetômetro a efeito kerr magneto-óptico**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Física, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 133 p, 2006.

HADDAD, J. et AL. **EFICIENCIA ENERGÉTICA – Integrando Usos e Reduzindo Desperdícios**. Brasília: Agencia Nacional de Energia Elétrica (Brasil), 1999.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Física**, Eletricidade, Magnetismo e Optica, Parte II, 2ª.Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1971.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K.S.; **Física 3**, 5.Ed. Ao Livro Técnico, Rio de Janeiro: LTC, 2003. <http://www.suapesquisa.com/pesquisa/magnetismo.htm>. Acesso em 18/08/2009.

JOHNSON, H. **Permanent magnet motor**. USPTO Pat. nº 4.151.431, 04/1979.

LEITE, J. A. **Metodologia de Elaboração de Teses**. São Paulo/SP: McGraw-Hill do Brasil, 1978.

LOPES, F. R. Relatório Final: **Construção de um motor magnético do tipo Perendev**, Orientador: Dr. Juan C. P. Campoy, UNICAMP-SP, Campinas, 2007.

MALAFAIA, M. C. **Motor magnético**, INPI Pat. nº PI8900294 A, 08/1990.

MBT, **Energia Autônoma**. [http://www.mbtenergia.com.br/energia\\_autonoma.htm](http://www.mbtenergia.com.br/energia_autonoma.htm). Acesso em 19/08/2009.

MECATRÔNICA ATUAL. **Automação Industrial de Processos e Manufatura**. <http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/180>. Acesso em 18/08/2009.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: 3 – Eletromagnetismo**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

OLIVIERI, J. C. Confiabilidade Metrológica e Cálculo de Incerteza, Agosto 2002, em <http://jcolivieri.sites.uol.com.br/maqualab/maprolab/mppi01r0.htm>. Acesso em 02/03/2011.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia – Microestrutura e Propriedades**. 1ed. São Paulo: Hemus, 2007.

SALMERON, R. A. **Introdução à eletricidade e ao magnetismo**., 4ª Ed. D. São Paulo: Salmeron C. Gomes Editora, 1964.

ULABY, F. T. **Eletromagnetismo para engenheiros**. Editora Bookman, 2007.

WENTWORTH, S. M. **Fundamentos de Eletromagnetismo com aplicação em Engenharia**. Editora LTC, 374 p, 2006.

SCHAUM, D. **Física Geral**. Editora McGraw-Hill, 1979.

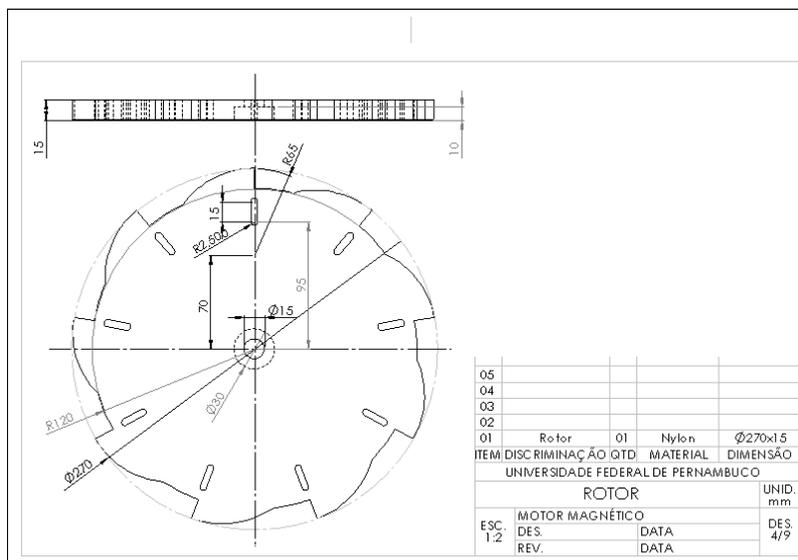
TIPLER, P. A. e MOSCA, G. **Física:** Eletricidade e magnetismo, ótica. 5. ed. Vol.2. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2006.

\_\_\_\_\_, **Física para Cientistas e Engenheiros**, 6ª ed. volume 2 - Eletricidade e Magnetismo, Ótica. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

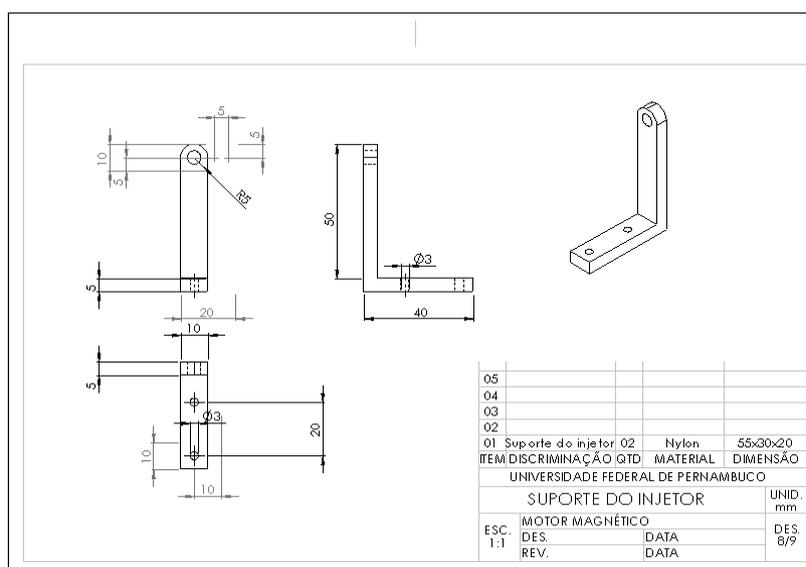
TURRINI, E. **O Caminho do Sol** – O uso da Energia Solar. Petrópolis-RJ: Vozes, 1993.

## ANEXOS

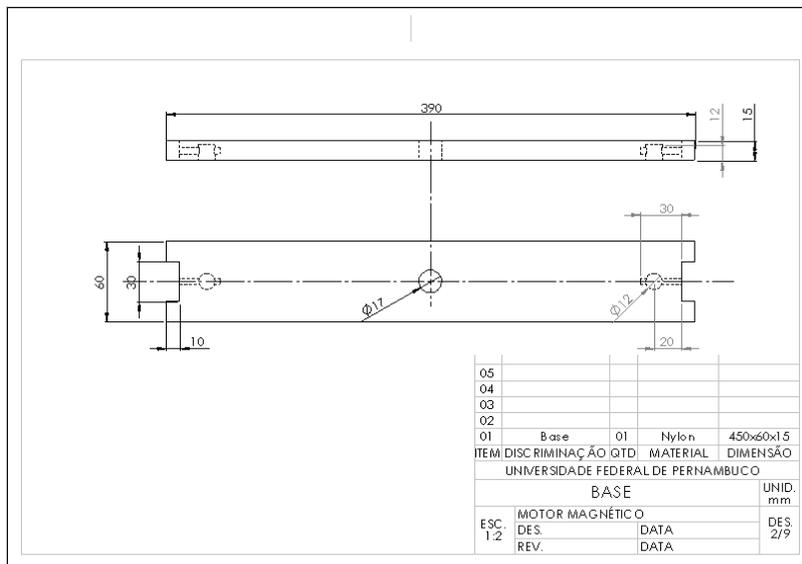
Folhas de fabricação das peças do protótipo em desenhos CAD.



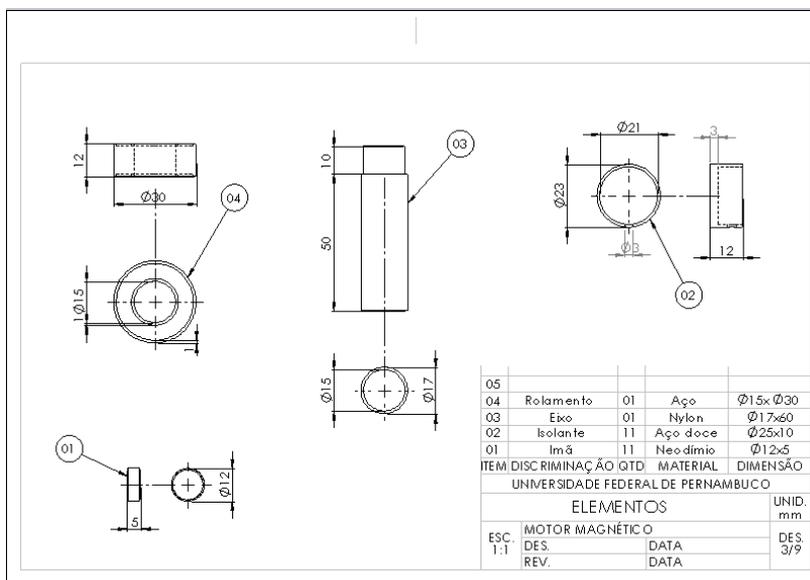
Detalhe do rotor do protótipo que pela sua geometria não convencional para fabricação em um maquinário que se movimenta em dois eixos (X,Y), foi fabricado em centro de usinagem computadorizado utilizando-se nylon como matéria prima.



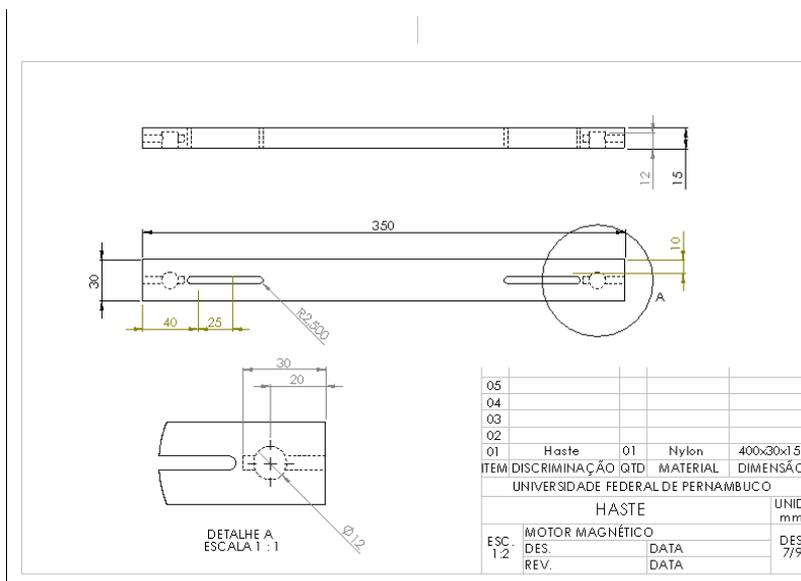
Detalhe do suporte do injetor com suficiente mobilidade, para poder encontrar o seu melhor posicionamento. Fabricado com nylon em plaina mecânica.



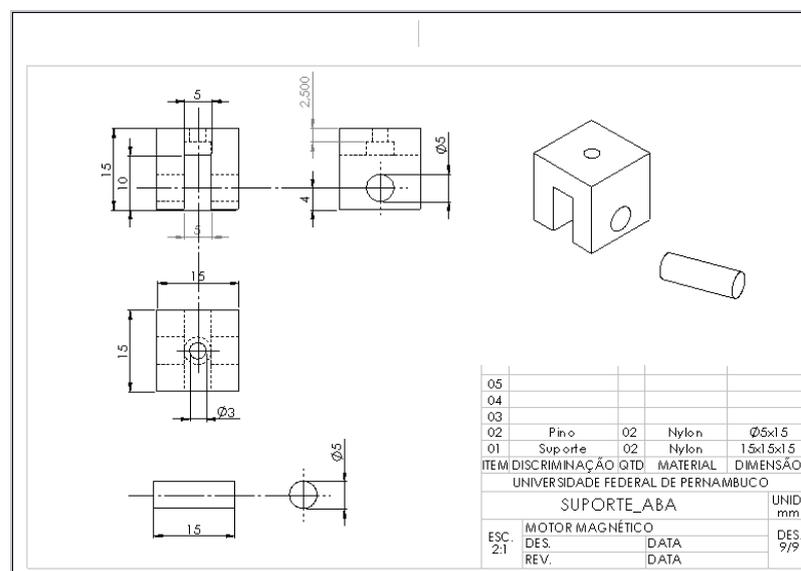
Detalhe da base do protótipo servindo também para fixação do eixo do rolamento e dos suportes da haste. Fabricada com nylon em plaina mecânica.



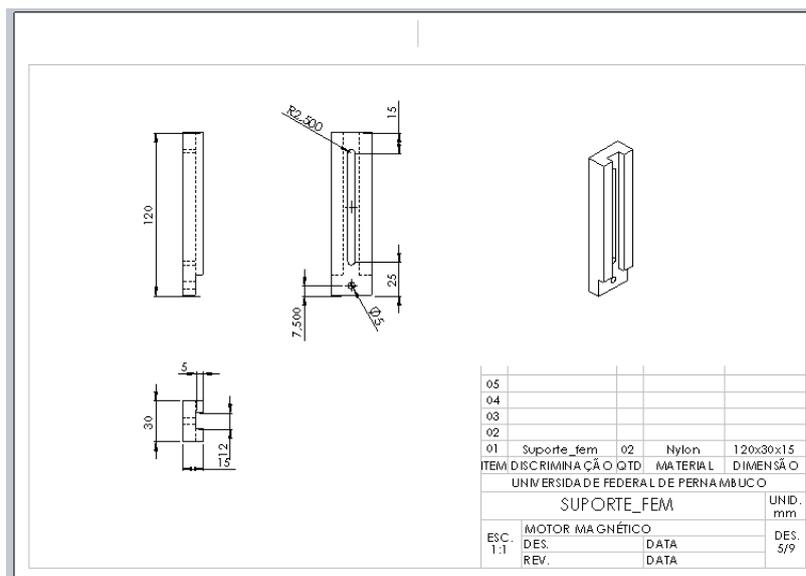
Detalhe de elementos de máquinas utilizados na montagem do rotor. Rolamento SKF 30 e imã de neodímio. O eixo e o isolante em aço 1020 foram fabricados em torno convencional.



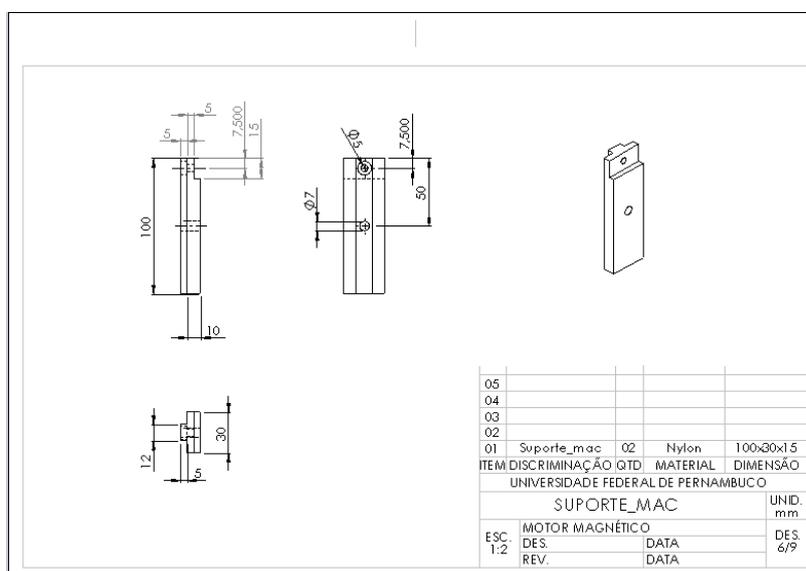
Detalhe da haste para fixação dos suportes do injetor. Utilizou-se em sua fabricação a plaina mecânica e a furadeira e o nylon como matéria prima.



Detalhe da caixa de mobilidade fixada à haste e acoplada ao suporte do injetor. Utilizou-se plaina mecânica e furadeira na sua construção e o nylon como matéria prima.



Detalhe do suporte fixo para ser parafusado na base servindo de apoio deslizante para o suporte móvel que regula a altura do injetor. Fabricado com o material nylon em plaina mecânica e furadeira.



Detalhe do suporte deslizante fabricado em nylon, destinado a regular a altura do injetor que desliza no suporte fixo, tendo a haste parafusada em sua parte superior. Fabricado em plaina mecânica e furadeira.



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Ata da centésima sexagésima segunda (162ª) Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia e Geociências – Escola de Engenharia de Pernambuco da Universidade Federal de Pernambuco, realizada no dia 30 (trinta) de março de 2011 (dois mil e onze).

Ao dia 30º (trigésimo) do mês de março de dois mil e onze (2011), às 14h00 (quatorze horas), no Laboratório de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica, Térreo do Centro de Tecnologia e Geociências – Escola de Engenharia de Pernambuco da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), foi aberta a sessão Pública de Defesa de Dissertação de Mestrado pelo Dr. Alex Maurício Araújo para apresentação e defesa da dissertação intitulada “Estudo Analítico de um Protótipo de Rotor Magneto”, elaborada pelo mestrando Roberto de Araújo Alecio, sob a orientação do Dr. Alex Maurício Araújo e co-orientação do Dr. Tiago Leite Rolim. A Banca Examinadora foi indicada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, na sua 2ª (segunda) Reunião Ordinária realizada em 10 (dez) de março de 2011 e homologada pelo Diretor de Pós-graduação da Pró-Reitoria para Assuntos de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESQ) em 24 de março de 2011, ficando composta pelos seguintes membros: Dr. Alex Maurício Araújo, na qualidade de Presidente, Dr. Tiago Leite Rolim, Dr César Henrique Gonzalez e Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira como examinadores titulares; Dr. Jorge Recarte Henríquez Guerrero e Dr.ª Olga de Castro Vilela como suplentes. Dando continuidade, o orientador, após apresentar a Banca Examinadora e informar que o mestrando dispunha de trinta (30) a cinquenta (50) minutos para sua apresentação, passou a presidir os trabalhos da Banca. O Presidente convocou os membros da Banca e os demais presentes para assistirem à apresentação da dissertação pelo candidato. Em seguida, o candidato foi arguido por cada Examinador, sob forma de diálogo. Após a apresentação e debate, a Banca, deliberando em recinto fechado, resolveu aprovar o candidato por unanimidade, com a menção “Aprovado”, em consonância com o do Artigo 44 (quarenta e quatro), da Resolução 10/2008 do Conselho Coordenador de Ensino, Pesquisa e Extensão (CCEPE) e o Artigo 51 (cinquenta e um) do Regimento do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco. E, para constar, eu, Luana Antero de Melo, secretarici esta defesa de dissertação e lavrei a presente Ata, que assino com o candidato, com a Banca Examinadora e com quem de direito. Recife, 30 de março de 2011.

*[Assinaturas manuscritas]*  
 Alex Maurício Araújo  
 Roberto de Araújo Alecio  
 Tiago Leite Rolim  
 César Henrique Gonzalez  
 Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira  
 Jorge Recarte Henríquez Guerrero  
 Olga de Castro Vilela  
 Luana Antero de Melo