

**ANDRÉ KÜLL AGUILLAR**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA  
COMPUTACIONAL PARA PROJETOS DE UM  
ATUADOR MAGNÉTICO BIESTÁVEL MONO-  
BOBINA**

**FLORIANÓPOLIS  
2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA  
COMPUTACIONAL PARA PROJETOS DE UM  
ATUADOR MAGNÉTICO BIESTÁVEL MONO-  
BOBINA**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**ANDRÉ KÜLL AGUILLAR**

Florianópolis, maio de 2007.

# **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA PROJETOS DE UM ATUADOR MAGNÉTICO BIESTÁVEL MONO-BOBINA**

André Küll Aguillar

“Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.”

---

Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr.  
Orientador

---

Prof.<sup>a</sup> Kátia Campos de Almeida, Ph. D.  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr.  
Presidente

---

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Co-orientador

---

Prof. Enio Valmor Kassick, Dr.

---

Prof. Nelson Sadowski, Dr.

---

Prof. Maurício Valência Ferreira da Luz, Dr.

Dedico este trabalho  
aos meus pais, Nilton e Edcle,  
e aos meus irmãos, Andressa e Alexandre.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos por ficarem sempre do meu lado nos momentos de dificuldade e me apoiarem emocionalmente.

Ao professor e orientador Dr. João Pedro Assumpção Bastos pelas orientações, motivações e colaborações indispensáveis para a realização deste trabalho, bem como por todo conhecimento transmitido ao longo desses anos.

Ao professor Dr. Nelson Sadowski, sempre disposto em ajudar, e que muito contribuiu para agregar conhecimentos teóricos imprescindíveis para o desenvolvimento do trabalho e acima de tudo para o enriquecimento do aluno.

Ao co-orientador Dr. Nelson Jhoe Batistela pela colaboração na parte experimental, pelas contribuições como membro da Banca Examinadora e revisando esta dissertação.

Aos alunos e ex-alunos do GRUCAD (Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos) pela agradável convivência durante esses dois anos de estudos e pela troca de conhecimentos efetuados.

À empresa Artech por valorizar e sempre acreditar na concretização de um bom trabalho.

Ao NUMA (Núcleo de Manutenção da UFSC), em especial ao funcionário Jorge Luiz dos Santos Mazera, que efetuou o trabalho de suma importância de usinagem no protótipo do atuador.

Ao suporte financeiro da Capes, pelos dezessete meses de bolsa, sem os quais a realização deste trabalho seria extremamente penosa.

Ao administrador de rede do laboratório, Maurício Rigoni, sempre pronto a solucionar os problemas inesperados dos computadores.

À secretária Celly Dulcemar Melo pela sua disposição em ajudar.

A todas as pessoas que contribuíram indiretamente para o meu crescimento pessoal e profissional e que neste curto espaço fica impossível de agradecer.

E finalmente, a Deus, por me dar saúde, conhecimento e tranquilidade para atingir meus objetivos profissionais e pessoais.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **Desenvolvimento de um Sistema Computacional para Projetos de um Atuador Magnético Biestável Mono-Bobina**

**André Küll Aguillar**

Maio/2007

Orientador: João Pedro Assumpção Bastos, Dr.

Co-orientador: Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras-chave: atuador magnético, ímãs permanentes, mono-bobina, projeto, elementos finitos, forças, simulação dinâmica.

Número de páginas: 65.

**RESUMO:** O presente trabalho aborda o desenvolvimento e a análise de um sistema computacional para o auxílio em projetos de atuador magnético linear biestável mono-bobina. O princípio de funcionamento, de forma geral e em detalhes deste tipo de atuador é explicado. Foi realizada a construção de um protótipo no laboratório bem como uma bancada experimental para que dados teóricos e práticos fossem comparados. Foram empregadas as equações de circulação de campos e conservação de fluxo na estrutura em duas dimensões (2D) para o cálculo dos parâmetros magnéticos, os quais foram calibrados através de uma análise através do Método de Elementos Finitos. Equações elétricas, magnéticas e mecânicas foram acopladas na realização da análise do comportamento dinâmico da estrutura. Os requisitos para o projeto de atuador como: as dimensões da estrutura, características da bobina, dos ímãs, forças, entre outros, foram relacionados com os cálculos dos parâmetros eletromagnéticos e com a simulação dinâmica da estrutura com a finalidade de fornecer resultados que variam de acordo com as características exigidas no projeto.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **Development of a Computational System for Mono-Coil Bistable Magnetic Actuator Designs**

**André Küll Aguillar**

May/2007

Advisor: João Pedro Assumpção Bastos, Dr.

Co-advisor: Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices.

Keywords: magnetic actuator, permanent magnets, mono-coil, design, finite elements, forces, dynamic simulation.

Number of pages: 65.

**ABSTRACT:** This work deals with the development and analysis of a computational system to support engineers on the design of mono-coil bistable magnetic actuator. The operating principle, general and in details, of this kind of actuator is then explained. A prototype was built at the laboratory and an experimental bench was set to compare theoretical data and experimental ones. The magnetic field circulation and the flux conservation equations were used on the two dimensions (2D) structure to calculate the magnetic parameters, which were calibrated through the Finite Element Method analysis. Electric, magnetic and mechanical equations were coupled in order to analyze the dynamic behavior of the structure. The project requirements such as: the structure dimensions, coil characteristics, magnet characteristics, forces, and others, were related with the electromagnetic parameters calculation and with the dynamic simulation in order to provide results depending on the project characteristics.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	DEFINIÇÃO E APLICAÇÕES DOS ATUADORES MAGNÉTICOS .....	1
1.2	OBJETIVO DO TRABALHO .....	1
1.3	O OBJETO DE ESTUDO .....	2
1.3.1	<i>Aplicação em Disjuntores a Vácuo .....</i>	<i>3</i>
1.3.2	<i>Importância dos ímãs .....</i>	<i>5</i>
1.4	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	7
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ATUADOR .....</b>	<b>8</b>
2.1	FUNCIONAMENTO GERAL .....	8
2.2	A DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO MAGNÉTICO .....	9
2.3	ANÁLISE ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS .....	13
2.3.1	<i>Cálculos de Campos .....</i>	<i>14</i>
2.3.2	<i>Cálculos de Forças .....</i>	<i>18</i>
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>PARTE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>22</b>
3.1	O PROJETO DO PROTÓTIPO .....	22
3.1.1	<i>Metodologia para a Confeção do Protótipo .....</i>	<i>22</i>
3.1.2	<i>Dados Técnicos .....</i>	<i>24</i>
3.1.3	<i>Cálculos pelo MEF .....</i>	<i>25</i>
3.2	A BANCADA EXPERIMENTAL .....	30
3.3	DADOS ADQUIRIDOS .....	31
3.3.1	<i>Aquisição pelo Osciloscópio .....</i>	<i>31</i>
3.3.2	<i>Análise Qualitativa das Curvas Obtidas .....</i>	<i>32</i>
3.3.3	<i>Análise Quantitativa das Curvas Obtidas .....</i>	<i>34</i>
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>SISTEMA PARA PROJETO DE ATUADORES .....</b>	<b>37</b>
4.1	OS MÓDULOS DO PROGRAMA .....	37
4.1.1	<i>Módulo 1 .....</i>	<i>38</i>
4.1.2	<i>Módulo 2 .....</i>	<i>45</i>
4.1.3	<i>Módulo 3 .....</i>	<i>46</i>
4.2	SIMULAÇÃO DINÂMICA .....	46
4.3	OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS .....	49
4.3.1	<i>Parametrização pelo MEF .....</i>	<i>50</i>
4.3.2	<i>Parametrização através de equações analíticas .....</i>	<i>51</i>
4.4	RESULTADOS OBTIDOS .....	56
4.4.1	<i>Calibração do Programa de Simulação Dinâmica .....</i>	<i>57</i>
4.4.2	<i>Comparação entre as Curvas Experimentais e Simuladas .....</i>	<i>58</i>
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE .....</b>	<b>60</b>
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>62</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Foto do atuador em estudo. ....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1.2 Principais componentes de um disjuntor [13]. ....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1.3 Vista em corte do disjuntor [10].....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.1 Estrutura geral do atuador. ....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.2 Estrutura do atuador em estudo. ....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.3 Fluxo magnético apenas do ímã com a peça P à direita. ....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.4 Fluxo magnético criado pela bobina para um movimento para a esquerda. ..</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.5 Interação entre os fluxos do ímã e da bobina para um movimento para a esquerda. ....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.6 Fluxo magnético apenas do ímã com a peça P à esquerda. ....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.7 Fluxo criado pela bobina para um movimento para a direita. ....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.8 Interação entre os fluxos do ímã e da bobina para um movimento para a direita. ....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.9 Dimensões do atuador utilizado para os cálculos de campos. ....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.10 Malha utilizada para os cálculos pelo MEF. ....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.11 Curva de saturação do material ferromagnético do atuador. ....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.12 Distribuição do campo magnético: (a) somente do ímã com a peça móvel à direita, (b) para um deslocamento de 3 mm para a esquerda considerando o ímã e a bobina, (c) para um deslocamento de 14 mm para a esquerda considerando o ímã e a bobina. ....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.13 Distribuição do campo magnético: (a) somente do ímã com a peça móvel à esquerda, (b) para um deslocamento de 3 mm para a direita considerando o ímã e a bobina, (c) para um deslocamento de 14 mm para a direita considerando o ímã e a bobina. ....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.14 Forças em função do deslocamento para o lado esquerdo. ....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.15 Forças resultantes em função do deslocamento para o lado esquerdo. ....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.16 Forças em função do deslocamento para o lado direito. ....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.17 Forças resultantes em função do deslocamento para o lado direito. ....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.1 Foto do protótipo construído. ....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.2 Dimensões empregadas no protótipo. ....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.3 Malha para os cálculos na estrutura referente ao protótipo construído. ....</i>	<i>25</i>

<i>Figura 3.4 Distribuição do campo magnético no protótipo: (a) somente do ímã com a peça móvel à direita, (b) para um deslocamento de 3 mm para a esquerda considerando o ímã e a bobina, (c) para um deslocamento de 12 mm para a esquerda considerando o ímã e a bobina. ....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.5 Distribuição do campo magnético no protótipo: (a) somente do ímã com a peça móvel à esquerda, (b) para um deslocamento de 3 mm para a direita considerando o ímã e a bobina, (c) para um deslocamento de 12 mm para a direita considerando o ímã e a bobina. ....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.6 Forças em função do deslocamento para o lado esquerdo. ....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3.7 Forças resultantes em função do deslocamento para o lado esquerdo. ....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3.8 Forças em função do deslocamento para o lado direito. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.9 Forças resultantes em função do deslocamento para o lado direito. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.10 Foto da bancada experimental construída. ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.11 Foto da tela do osciloscópio com os sinais de corrente e tensão adquiridos. ....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.12 Painel de controle do programa desenvolvido em LabView. ....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.13 Curvas de corrente e tensão para análise qualitativa. ....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.14 Verificação do tempo do movimento principal em função da tensão da bobina e da carga da armadura. ....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.15 Verificação do tempo do movimento reverso em função da tensão da bobina e da carga da armadura. ....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.1 Fluxograma do sistema computacional. ....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.2 Notações adotadas para o dimensionamento do atuador. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.3 Circuito magnético para o cálculo da força de retenção do ímã. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.4 Circuito magnético para o dimensionamento da bobina. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.5 Circuito elétrico equivalente do atuador. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.6 Caminhos dos campos magnéticos: apenas a bobina. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.7 Caminhos dos campos magnéticos: apenas o ímã. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.8 Simulação Dinâmica: (a) Corrente, (b) Deslocamento, (c) Velocidade. ....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.9 Comparação dos resultados variando-se a tensão e com uma carga fixa de 0 N. ....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.10 Comparação dos resultados variando-se a carga e mantendo a tensão fixa em 90 V. ....</i>	<i>59</i>

## Capítulo 1

# INTRODUÇÃO

### 1.1 Definição e Aplicações dos Atuadores Magnéticos

Atuadores magnéticos são estruturas que utilizam energia magnética como um meio para transformar energia elétrica em energia mecânica [1], ou seja, são dispositivos que recebem um sinal elétrico (tensão ou corrente) capaz de provocar a criação de campos magnéticos no seu interior. Estes campos produzem forças mecânicas que irão movimentar alguma peça.

Há uma variedade muito grande de aplicações onde atuadores magnéticos podem ser usados, por exemplo, em “disk drivers” [2], para ajustar o foco de câmeras fotográficas [3], em sistemas eletros-hidráulicos de aviões, tratores ou robôs [4], em aplicações biomédicas [5], em disjuntores [6], entre outras [1],[7].

Devido a essa enorme possibilidade de uso dos atuadores magnéticos, eles são muito diferentes entre si, mas mantêm o mesmo princípio de funcionamento. As diferenças construtivas são necessárias devido aos requisitos de cada aplicação, ou seja, deve-se prestar atenção em diversas características como, por exemplo, a intensidade da força produzida pelo atuador, sua precisão, a velocidade, o tempo de deslocamento da peça móvel, a vibração da estrutura, a presença ou ausência de som no movimento, entre outros.

Para o presente trabalho será utilizado um atuador magnético que se aplica principalmente em disjuntores elétricos.

### 1.2 Objetivo do Trabalho

Assim como há diversos tipos de atuadores magnéticos, pode-se também utilizar o mesmo modelo em uma gama de aplicações muito variada. Desta forma, em determinada aplicação é necessário uma força maior ou menor que em outra, assim como se precisa saber se o tempo e a velocidade de acionamento do atuador são altos ou baixos.

Além das características citadas há outros requisitos em que um projetista deste tipo de estrutura possa estar interessado. Estes diversos requisitos de projeto fornecem a

possibilidade de se utilizar um atuador relativamente pequeno para um caso (força pequena, por exemplo) e outro maior para uma aplicação distinta.

Para reduzir as possibilidades de se escolher diversos tipos de atuadores para diferentes aplicações, elegeu-se apenas um tipo de atuador neste trabalho. Para tal escolha foi observado o baixo custo de fabricação da estrutura, bem como sua confiabilidade nas aplicações desejadas.

Dessa forma, é proposto neste trabalho um sistema computacional para ajudar engenheiros no projeto deste tipo de atuador. Tal sistema foi criado com a intenção de fornecer resultados rápidos e eficientes sem que o usuário disponha de conhecimentos aprofundados de eletromagnetismo.

### **1.3 O Objeto de Estudo**

Em 1987 Manchester University Energy Systems Group desenvolveu um novo tipo de atuador magnético, dando início ao emprego de ímãs permanentes em sua construção. Desde então, engenheiros de todo o mundo passaram a dar grande atenção aos atuadores com ímãs permanentes, e diversas empresas começaram a construir atuadores com o mesmo princípio de funcionamento [8].

Com o emprego de ímãs permanentes no atuador, este dispositivo ganha em confiabilidade, requer menor manutenção ao longo de sua vida útil, possui maior eficiência e ao mesmo tempo pode apresentar uma redução em suas dimensões externas [9].

Como já foi dito anteriormente, a estrutura a ser estudada neste trabalho é um atuador magnético linear biestável mono-bobina. Apesar de haver várias possibilidades de se utilizar tal atuador, o foco principal deste trabalho é na aplicação em disjuntores com extinção de arco a vácuo.

O atuador em estudo pode ser visto na Figura 1.1. Pode-se ver a presença de dois ímãs permanentes de NdFeB (1), uma peça móvel feita de material ferromagnético (2), um eixo também móvel de material não magnético (3), uma carcaça metálica feita de material ferromagnético (4) e uma bobina (5).

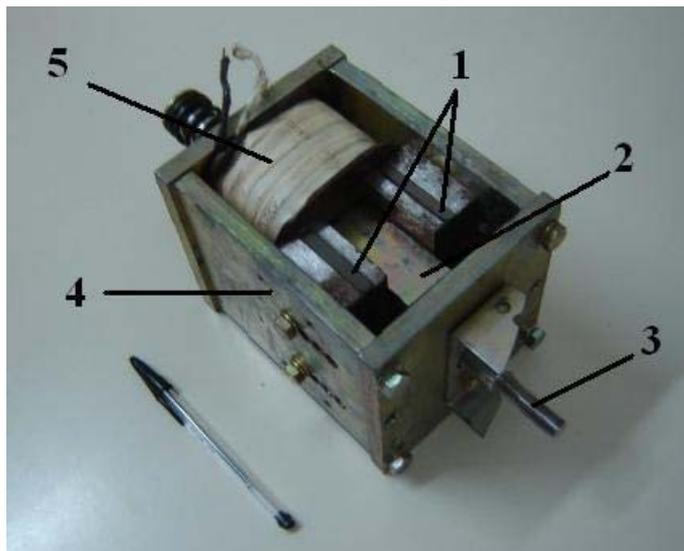


Figura 1.1 Foto do atuador em estudo.

### 1.3.1 Aplicação em Disjuntores a Vácuo

Os mecanismos utilizados em disjuntores a vácuo possuem características diferentes daqueles utilizados em disjuntores a ar, óleo ou SF<sub>6</sub> (hexafluoreto de enxofre). A interrupção de um circuito a vácuo requer um percurso curto dos contatos e uma força considerável para manter os contatos do disjuntor juntos enquanto há o curto-circuito [10].

Antes do emprego de ímãs permanentes em atuadores, as posições estáveis de abertura ou fechamento dos contatos dos disjuntores eram garantidas por mecanismos pneumáticos, hidráulicos, molas ou por solenóides. Com o emprego de ímãs permanentes em disjuntores a vácuo observa-se uma série de vantagens [10]-[12]:

- Equipamento livre de manutenção durante sua vida-útil.
- Elevada capacidade de interrupção.
- Baixa erosão do sistema de contatos.
- Baixo percurso dos contatos permitindo a simplificação do mecanismo de atuação e redução da energia requerida para o controle do disjuntor.

Dessa forma pode ser observada uma boa concordância entre os requisitos exigidos pelos disjuntores a vácuo e as vantagens oferecidas pelos atuadores magnéticos.

A Figura 1.2 [13] mostra os componentes principais de um disjuntor a vácuo utilizando um atuador magnético com duas bobinas. Para um disjuntor que utiliza um atuador mono-bobina há poucas mudanças em relação ao que se pode ver nesta.

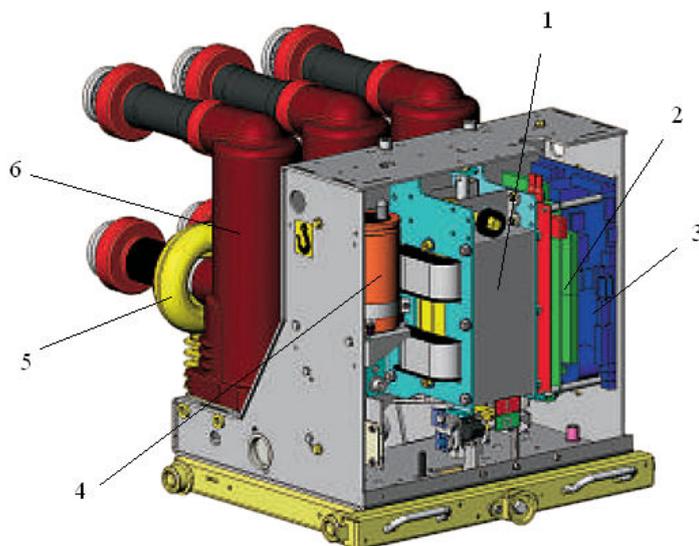


Figura 1.2 Principais componentes de um disjuntor [13].

- 1 – Atuador Magnético
- 2 – Entrada/Saída convencional
- 3 – Controle e proteção
- 4 - Capacitor
- 5 – Sensor de Rogowski
- 6 – Ampola a vácuo

Pode-se perceber na Figura 1.2 que há a presença de apenas um atuador magnético para efetuar a abertura ou o fechamento das três ampolas a vácuo simultaneamente. Entretanto se pode utilizar um atuador para cada ampola separadamente [14].

Essas duas possibilidades de emprego do atuador magnético admitem a utilização de atuadores de diferentes tamanhos e requisitos. Tal fato exemplifica mais uma vez a importância do desenvolvimento de um sistema computacional para ajudar no projeto desses equipamentos.

Ainda de acordo com a Figura 1.2 há um circuito eletrônico de controle e proteção que fará o controle do pulso aplicado na bobina do atuador, bem como um capacitor para armazenar a energia que será utilizada no acionamento da bobina. O sensor de Rogowski tem como função detectar o momento em que uma falta ocorre no circuito que o disjuntor está protegendo. E a ampola a vácuo é a câmara na qual se faz a extinção do arco provocado pela separação dos contatos do disjuntor.

A partir da Figura 1.3 [10] percebe-se de forma mais detalhada como ocorre a abertura ou o fechamento dos contatos do disjuntor devido ao deslocamento da peça móvel

do atuador magnético. Para a figura em questão mais uma vez pode-se perceber a presença de um atuador magnético com duas bobinas, entretanto se pode utilizar um atuador monobobina para esta mesma função.

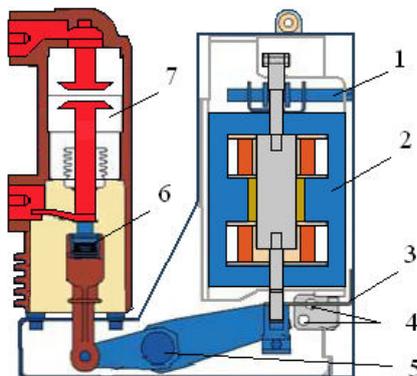


Figura 1.3 Vista em corte do disjuntor [10].

- 1 – Mecanismo manual de emergência
- 2 – Atuador magnético
- 3 – Indicador de posição
- 4 – Sensores de posição
- 5 – Eixo da alavanca
- 6 – Molas de contato
- 7 – Ampola a vácuo

Pode-se observar a presença de dois sensores de posição (4). Eles são responsáveis em mandar a informação sobre a posição em que a peça móvel se encontra para o circuito de controle. Dessa forma quando houver a necessidade de atuação, o circuito de controle processa tal informação e aplica a tensão adequada para o caso desejado (abertura ou fechamento dos contatos).

A força desenvolvida pela armadura do atuador será transferida para os contatos do disjuntor através de uma alavanca presa em um eixo (5) possibilitando o movimento desejado de abertura ou o fechamento dos contatos.

### 1.3.2 Importância dos ímãs

Os ímãs permanentes mais comumente utilizados são: ferrite, alnico, samário-cobalto (SmCo) e neodímio-ferro-boro (NdFeB). Para o emprego de ímãs permanentes em

atuadores magnéticos é importante que eles possuam altos valores de indução remanente ( $B_r$ ) e campo coercitivo ( $H_c$ ), bem como sejam resistentes a impactos mecânicos.

Os ímãs de ferrite possuem um valor elevado de  $H_c$ , porém baixo valor de  $B_r$ . Já ímãs de alnico possuem valor elevado de  $B_r$  e baixo valor de  $H_c$ . Dessa forma não possuem características favoráveis para serem aplicados em atuadores.

Com o surgimento dos ímãs de terras raras houve uma revolução nesta área de estudo, pois esses ímãs apresentam valores elevados tanto de indução remanente como de campo coercitivo. Entretanto, tais ímãs apresentam um preço muito elevado em comparação aos ímãs de ferrite e alnico.

Dessa forma percebe-se que os ímãs com características mais apropriadas para serem utilizados em atuadores magnéticos são os de terras raras. Dentre estes ímãs pode-se destacar os de NdFeB pois possuem um produto energético ( $BH_{máx}$ ) mais elevado que os de SmCo, são mais baratos e mecanicamente mais favoráveis, pois é possível protegê-los de choque mecânico e de corrosão [15].

Uma característica desfavorável dos ímãs de neodímio-ferro-boro é que eles possuem temperatura de operação mais baixa do que os ímãs de samário-cobalto, por isso para determinadas aplicações, por exemplo, em servomotores que necessitam de alto desempenho, é recomendado o uso de ímãs de SmCo em vez de NdFeB.

A Tabela 1.1 apresenta uma comparação entre algumas características dos ímãs comentados neste capítulo. Os valores foram fornecidos por uma empresa especializada na fabricação de ímãs e podem ser obtidos no “web site” da mesma [16].

Tabela 1.1 Características dos ímãs permanentes.

Tipo de Ímã	$B_r$ (T)	$H_c$ (kA/m)	$BH_{máx}$ (kJ/m)	$T_{máx}$ (°C)
<b>Ferrite</b>	0,36	231	25	350
<b>Alnico</b>	1,26	50	42	550
<b>SmCo</b>	1,03	637	183	250
<b>NdFeB</b>	1,21	923	334	100

Tendo em vista as características aqui apresentadas dos principais ímãs amplamente comercializados percebe-se que o ímã de neodímio-ferro-boro é o que mais se adapta às necessidades de um atuador magnético e foi o tipo de ímã utilizado no atuador em estudo.

## 1.4 Contribuições do Trabalho

Foi realizado neste trabalho um estudo de atuadores lineares biestáveis mono-bobina. Como contribuição para este tipo de estudo tem-se a elucidação em detalhes do princípio de funcionamento deste tipo de atuador levando em consideração o comportamento do fluxo magnético presente na estrutura.

Para o desenvolvimento de um sistema computacional de projetos desse tipo de atuador foi necessário a obtenção de equações analíticas que relacionam entre si os parâmetros dimensionais do atuador com o seu desempenho dinâmico. As análises dos circuitos magnéticos para a obtenção deste equacionamento foi outra contribuição relevante deste trabalho.

E por fim, a metodologia adotada utilizando-se o Método de Elementos Finitos para calibrar os resultados dos cálculos analíticos para levar em conta tanto a saturação do material como o espraçamento é um procedimento que pode ser utilizado em trabalhos distintos.

Como fruto deste trabalho, dois artigos foram aceitos e apresentados, sendo um em congresso nacional e outro em congresso internacional. Um terceiro artigo foi aceito e será apresentado em breve (final de junho de 2007) no mais importante congresso internacional da área (Compumag, Aachen).

## Capítulo 2

# O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ATUADOR

Neste capítulo será apresentada uma explicação geral do princípio de funcionamento do atuador magnético, seguida de uma análise mais minuciosa do comportamento dos fluxos magnéticos tanto dos ímãs quanto da bobina presentes no atuador. Será visto também uma análise da distribuição de campos magnéticos no interior da estrutura em estudo, bem como alguns cálculos referentes às forças de atração nos entreferros para que se possa avaliar o funcionamento adequado da estrutura [17].

### 2.1 Funcionamento Geral

A Figura 2.1 mostra um corte da estrutura geral de um atuador mono-bobina. Pode-se ver a presença de uma parte estacionária constituída de material ferromagnético, assim como uma armadura móvel feita com o mesmo tipo de material. Fixado à armadura e constituído de material não-magnético encontra-se um eixo móvel, e por fim podem ser vistos dois ímãs permanentes de terras raras e uma bobina.

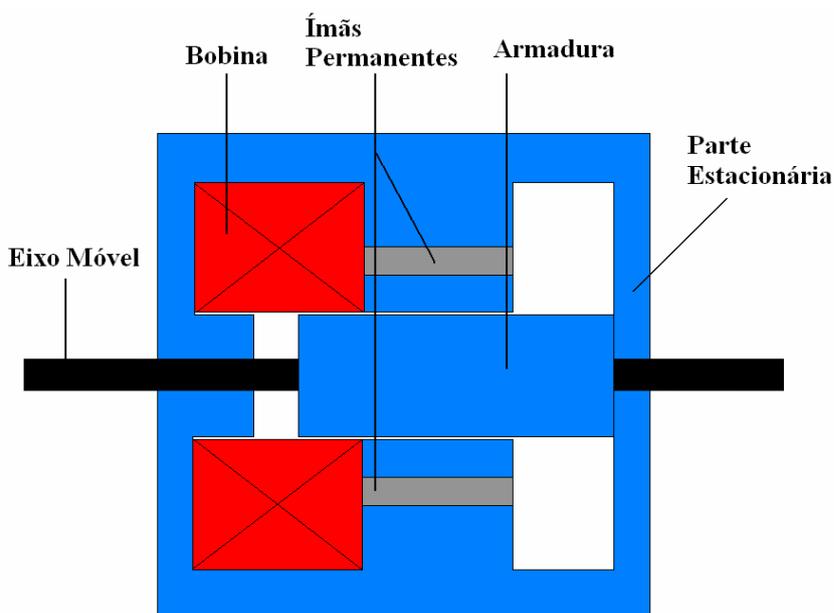


Figura 2.1 Estrutura geral do atuador.

Inicialmente o atuador encontra-se em uma das duas posições de equilíbrio possíveis, ou seja, a sua armadura apresenta-se ao lado direito (como na Figura 2.1) ou ao lado esquerdo do atuador. Essas posições são garantidas pela ação dos fluxos magnéticos produzidos pelos ímãs permanentes, visto que em repouso não há corrente circulando pela bobina.

Para que haja um movimento da armadura é necessário que se faça circular pelo enrolamento da bobina uma corrente elétrica em um determinado sentido. Essa corrente pode ser obtida, por exemplo, através de uma fonte de tensão contínua.

Com a aplicação de uma tensão contínua nos terminais da bobina e o surgimento de uma corrente elétrica nos enrolamentos da mesma, haverá o estabelecimento de um fluxo magnético nas partes constituintes do atuador (armadura, parte estacionária e ímãs). Este fluxo magnético proveniente da bobina vai interagir com o fluxo já existente dos ímãs. Como resultado desta interação haverá uma força magnética presente no entreferro da armadura, que agirá de forma a atrair a mesma para o lado desejado.

O deslocamento da armadura num primeiro momento é garantido aplicando-se corrente na bobina em um sentido do enrolamento e para o movimento inverso é necessário uma corrente no sentido oposto ao do primeiro movimento.

No item 2.2 é apresentado o comportamento mais detalhado dos fluxos magnéticos tanto dos ímãs quanto da bobina.

## **2.2 A Distribuição de Fluxo Magnético**

A Figura 2.2 apresenta o desenho da parte superior do atuador. Por uma questão de simetria pode-se efetuar o estudo em apenas metade da estrutura e em seguida fazer as considerações necessárias para que o domínio de cálculo leve em consideração o atuador inteiro.

Na Figura 2.2 a peça móvel é designada por P, o circuito magnético é composto tanto pela peça P como por F. Tais componentes não apresentam laminação. Há também uma bobina denominada por B e um ímã permanente de terras raras M.

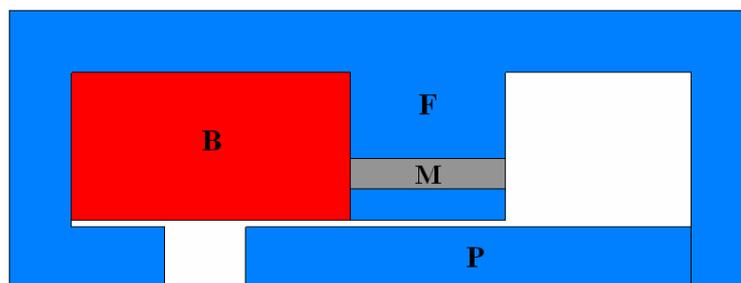


Figura 2.2 Estrutura do atuador em estudo.

A peça P está posicionada à direita (conforme Figura 2.2) ou à esquerda sem que haja corrente na bobina B. Esses posicionamentos da peça móvel são garantidos por uma força de atração intensa e estável produzida pela ação do ímã.

Para uma boa compreensão do funcionamento dinâmico do atuador será examinado primeiramente o caso em que a peça móvel faz o movimento do lado direito para o esquerdo. Na Figura 2.3 é observado, de maneira simplificada, o fluxo magnético criado apenas pelo ímã permanente.

O fluxo do ímã  $\phi_i^1$  é muito alto, pois ele se apresenta em um caminho magnético com baixa relutância, ao passo que  $\phi_i^2$  é relativamente pequeno devido à presença de um entreferro com relutância considerável.

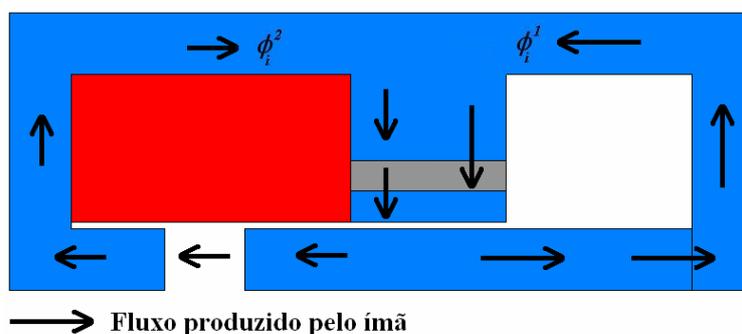


Figura 2.3 Fluxo magnético apenas do ímã com a peça P à direita.

Será visto agora a ação do fluxo criado apenas pela bobina, ou seja, quando é colocada uma corrente na direção indicada na Figura 2.4. Nesta figura é desconsiderada a ação do ímã M. Pode-se observar que o fluxo  $\phi_b^1$  localizado à direita do atuador encontra-se em sentido oposto ao fluxo criado pelo ímã e sua intensidade será relativamente menor que a do fluxo  $\phi_b^2$  criado pela bobina na região esquerda do atuador.

Em contrapartida com o que ocorre na região direita do atuador, os fluxos  $\phi_i^2$  do ímã e  $\phi_b^2$  da bobina do lado esquerdo encontram-se no mesmo sentido.

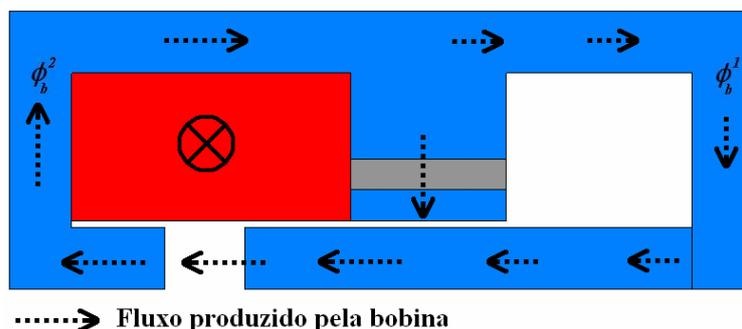


Figura 2.4 Fluxo magnético criado pela bobina para um movimento para a esquerda.

Considerando as ações tanto da bobina B quanto do ímã M, observa-se que os fluxos  $\phi_b^2$  e  $\phi_i^2$  são somados no entreferro do lado esquerdo do atuador, ao passo que  $\phi_b^1$  e  $\phi_i^1$  são subtraídos e idealmente se anulam no entreferro direito. O resultado dessa interação pode ser visto na Figura 2.5.

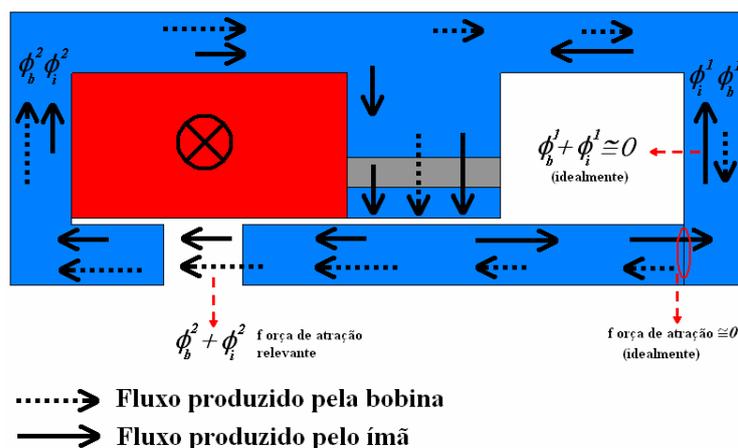


Figura 2.5 Interação entre os fluxos do ímã e da bobina para um movimento para a esquerda.

Dessa forma, haverá um fluxo magnético resultante de baixa intensidade do lado direito do atuador, fazendo com que a peça móvel esteja sujeita a uma força de atração muito pequena nesta região. Em contrapartida há um fluxo intenso no entreferro esquerdo fazendo com que a peça P seja atraída para este lado. No momento em que esse movimento se conclui o atuador estará em outro estado de equilíbrio; neste instante a corrente da bobina é suprimida e o ímã manterá a peça móvel fortemente estabilizada à esquerda.

Será examinado agora como fazer para que P se movimente para o lado direito. Inicialmente é observado a Figura 2.6 onde se tem o fluxo magnético criado apenas pelo ímã quando P encontra-se à esquerda do atuador. Nessa figura o fluxo magnético  $\phi_i^4$  é intenso ao passo que  $\phi_i^3$  é relativamente pequeno. Tal fato se deve à presença de um entreferro muito grande do lado direito e a ausência do mesmo do lado esquerdo do atuador.

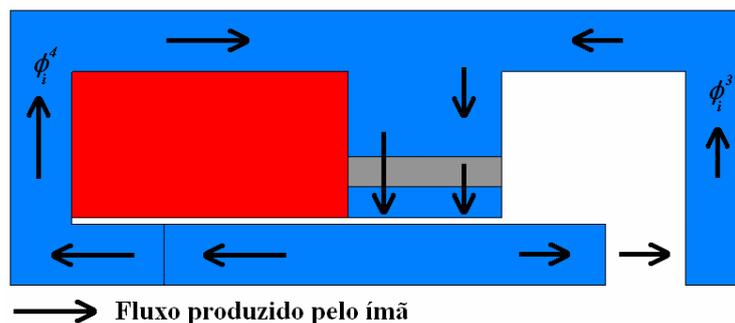


Figura 2.6 Fluxo magnético apenas do ímã com a peça P à esquerda.

Para movimentar P para o lado direito é necessário aplicar uma corrente em B com o sentido oposto ao aplicado no movimento anteriormente analisado. A Figura 2.7 mostra os fluxos  $\phi_b^3$  e  $\phi_b^4$  criados pela bobina para esta nova situação.

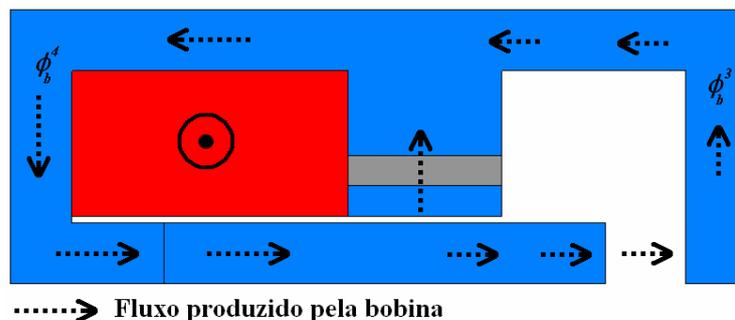


Figura 2.7 Fluxo criado pela bobina para um movimento para a direita.

Similarmente com o ocorrido no movimento anterior, agora os fluxos do ímã e da bobina tendem a se anular do lado esquerdo da peça móvel e são somados do lado direito. Isto faz com que haja uma força de atração intensa do lado direito da peça P atraindo-a para este lado. O resultado da interação dos fluxos para esta nova situação é mostrado na Figura 2.8.

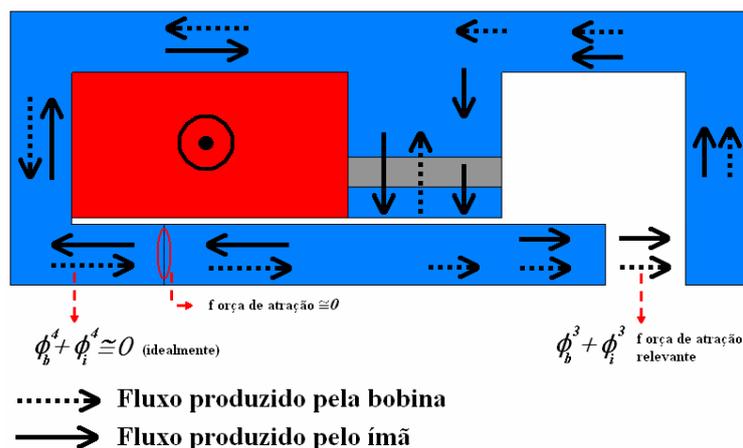


Figura 2.8 Interação entre os fluxos do ímã e da bobina para um movimento para a direita.

Novamente quando o movimento da peça móvel é totalmente concluído tem-se o atuador na posição de equilíbrio inicial (P ao lado direito do atuador) e a corrente que atravessa a bobina é cessada.

### 2.3 Análise através do Método de Elementos Finitos

Com a intenção de estudar o funcionamento do atuador de uma forma mais profunda, foram realizados cálculos de distribuição de campos no domínio de estudo através do Método de Elementos Finitos (MEF) [18]. Dessa forma tem-se a possibilidade de avaliar as forças que surgem nos entreferros da estrutura e provocam o deslocamento da armadura.

Para a realização de cálculos em uma estrutura real utilizou-se um atuador efetivamente construído. Foram realizadas medidas para saber as dimensões de cada peça presente na estrutura e, em seguida, utilizar estas medidas para os cálculos de campos e forças.

As medidas do atuador utilizadas para os cálculos podem ser vistas na Figura 2.9:

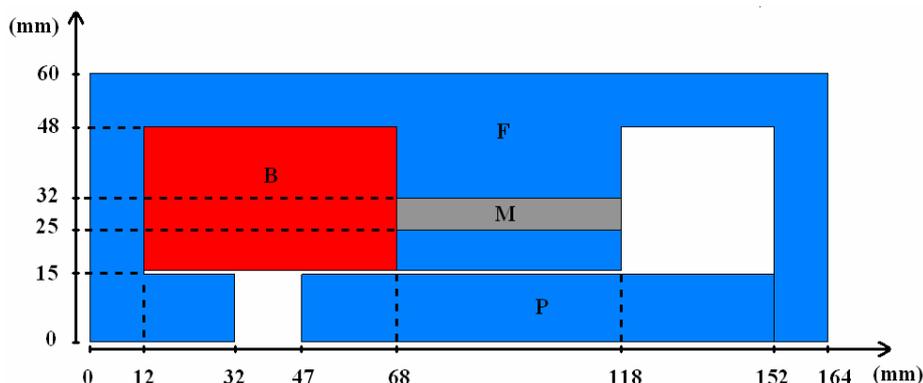


Figura 2.9 Dimensões do atuador utilizado para os cálculos de campos.

### 2.3.1 Cálculos de Campos

A análise da distribuição de campos para o atuador disponível para o estudo foi realizada com a ajuda do programa EFCAD – Electromagnetic Fields Computer Aided Design [19] desenvolvido no Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos – GRUCAD – UFSC. Nesta etapa de estudo não são consideradas as correntes induzidas que surgem no atuador devido à brusca variação de fluxo magnético. Sendo assim, efetuou-se uma análise magnetostática em duas dimensões (2D) para cada posição da peça móvel.

Como a corrente que circula na bobina apresenta um comportamento variável em relação ao tempo, se faz necessária uma análise do comportamento dinâmico do atuador para se obter um cálculo da corrente com mais precisão. Tal análise será efetuada nos capítulos vindouros. Para esta etapa foram considerados cálculos estáticos de distribuição de campos para valores discretos de densidade de corrente, assim como valores discretos para os deslocamentos da armadura.

Para que os cálculos pelo MEF fossem satisfatórios utilizou-se a mesma malha para se efetuar todos os cálculos, variando-se apenas a densidade de corrente e o posicionamento da armadura [20]. Dessa forma uma comparação entre todos os cálculos efetuados será válida, uma vez que não haverá um cálculo mais preciso que outro por conta de uma malha ser mais refinada que outra.

Para que se utilize a mesma malha para todos os posicionamentos da armadura, escolheu-se uma malha com espaçamentos de 1 mm entre as arestas verticais nas zonas onde se têm os entreferos tanto do lado esquerdo como do lado direito da armadura. Tal área foi denominada de banda de movimento. Sendo assim os cálculos na região dos

entreferos, a qual possui um espaçamento total de 15 mm, podem ser realizados com deslocamentos de 1 mm de espaçamento entre eles. A malha utilizada pode ser vista na Figura 2.10.

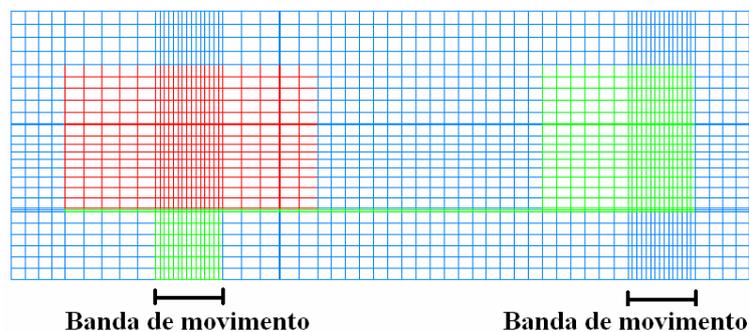


Figura 2.10 Malha utilizada para os cálculos pelo MEF.

Em todos os cálculos realizados pelo EFCAD através do MEF levou-se em consideração a curva de saturação do material ferromagnético do atuador, ou seja, foram realizados cálculos não-lineares pelo MEF, considerando a curva BxH do material apresentada na Figura 2.11.

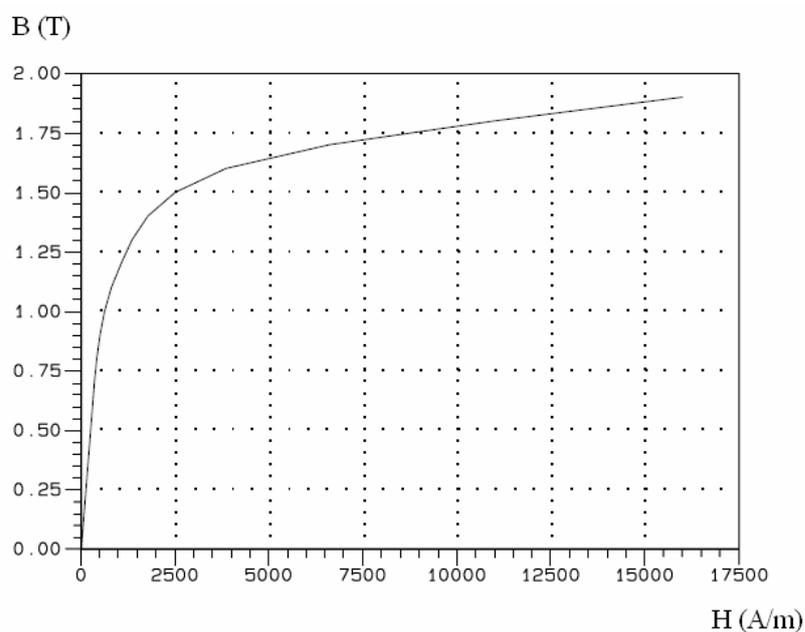


Figura 2.11 Curva de saturação do material ferromagnético do atuador.

Para os cálculos efetuados a seguir foram considerados valores médios de densidade de corrente na bobina de 2, 3, 6 e 9 A/mm<sup>2</sup>, típicos para este tipo de aplicação em que a corrente é imposta de forma momentânea, e a priori, sem riscos de aquecimento excessivo. Na Figura 2.12 são apresentados os resultados de distribuição de campo magnético obtidos

via cálculos para um deslocamento da armadura da direita para a esquerda e com um valor médio de densidade de corrente de  $6 \text{ A/mm}^2$ . O sentido da corrente também pode ser visualizado nesta figura.

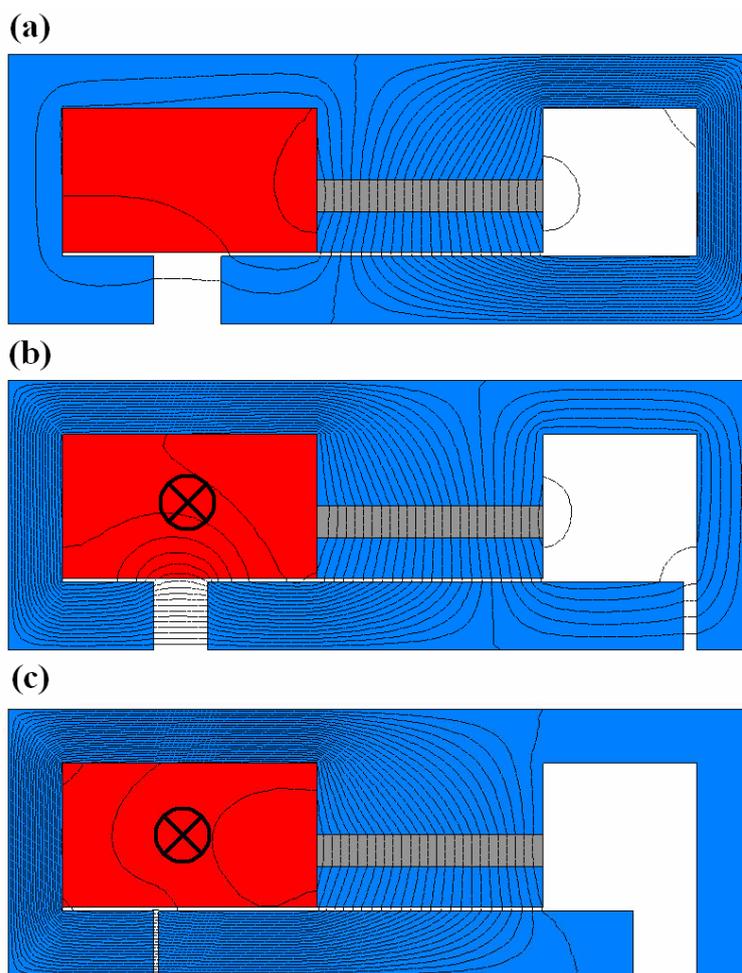


Figura 2.12 Distribuição do campo magnético: (a) somente do ímã com a peça móvel à direita, (b) para um deslocamento de 3 mm para a esquerda considerando o ímã e a bobina, (c) para um deslocamento de 14 mm para a esquerda considerando o ímã e a bobina.

Analisando os resultados obtidos, pode-se confirmar o que já foi dito no item 2.2, ou seja, observando apenas a Figura 2.12(a) em que não há corrente de excitação na bobina, percebe-se que há uma concentração de linhas de campo do lado direito do atuador. Essas linhas de campo serão responsáveis pela criação de uma força de atração que manterá a armadura fixa do lado direito do atuador.

Ao se adicionar uma corrente na bobina no sentido adequado percebe-se que há uma concentração maior de linhas de campo do lado esquerdo da armadura e não mais do lado direito. Isto fará com que haja uma força maior de atração do lado esquerdo atraindo a

armadura para este lado. Tal fato pode ser confirmado na Figura 2.12(b) e na Figura 2.12(c).

Já na Figura 2.13 são apresentados alguns resultados de distribuição de campo magnético obtidos via cálculos para um deslocamento da armadura da esquerda para a direita e com um valor médio de densidade de corrente de  $2 \text{ A/mm}^2$ . O sentido da corrente é invertido para este movimento.

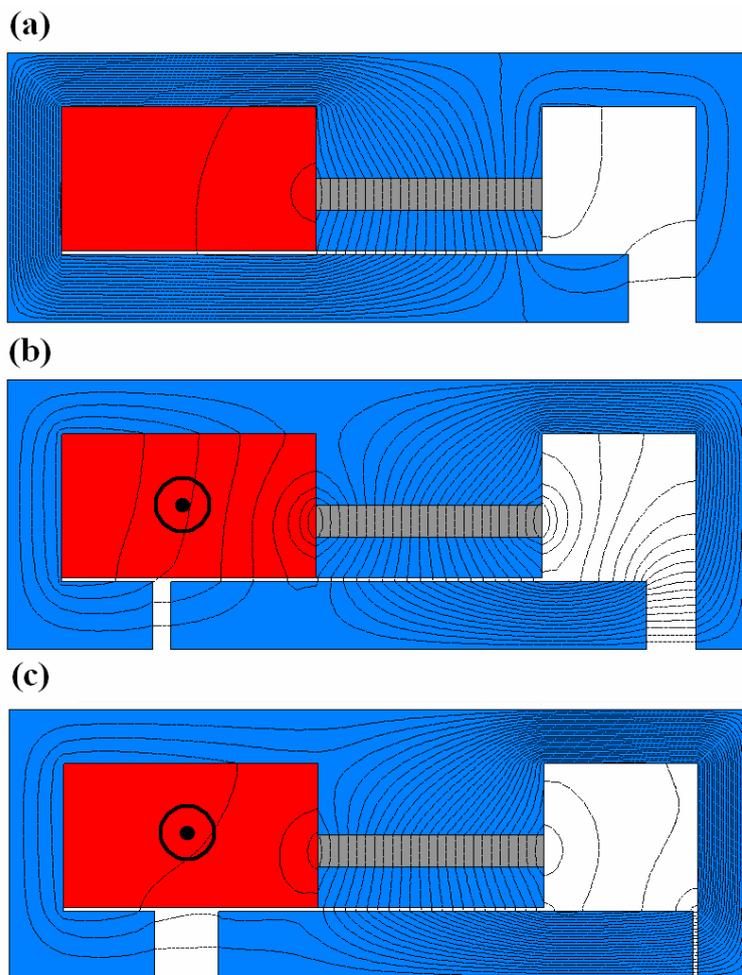


Figura 2.13 Distribuição do campo magnético: (a) somente do ímã com a peça móvel à esquerda, (b) para um deslocamento de 3 mm para a direita considerando o ímã e a bobina, (c) para um deslocamento de 14 mm para a direita considerando o ímã e a bobina.

Vê-se na Figura 2.13 um comportamento semelhante com o que ocorreu no movimento anterior, ou seja, para este novo caso, na ausência de corrente na bobina percebe-se uma grande concentração de linhas de campo do lado esquerdo fazendo com que a armadura permaneça fixa deste lado. Além disso, ao se aplicar corrente na bobina a

concentração de linhas de campo muda de lado, fazendo com que a armadura seja atraída para o lado direito.

As diferenças que se pode perceber entre o primeiro movimento e o segundo é que no primeiro movimento aplicou-se corrente em um sentido e no segundo movimento no sentido oposto. Para o primeiro movimento utilizou-se uma densidade média de corrente de  $6 \text{ A/mm}^2$  e para o segundo movimento  $2 \text{ A/mm}^2$ , isto porque o segundo movimento é efetuado de maneira mais adequada para correntes menores. Tal fato será melhor explicado no próximo item. E por fim pode-se perceber que há uma dispersão de linhas de campos maior no segundo movimento do que no primeiro, pois apesar dos dois movimentos serem semelhantes não se pode considerar como um movimento sendo exatamente simétrico em relação ao outro.

### 2.3.2 *Cálculos de Forças*

O cálculo de campos magnéticos pelo MEF permite, com a utilização do Tensor de Maxwell [21],[22], a obtenção de forças que se criam pela existência de campo magnético envolvendo a armadura. Tais forças foram calculadas com a ajuda do programa EFCAD.

Como já visto anteriormente, o domínio de cálculo leva em consideração a simetria da estrutura e se utiliza apenas metade do tuador. Entretanto, os resultados que serão apresentados em breve já foram devidamente modificados para atender valores referentes ao atuador inteiro e não apenas metade. Além disso, os cálculos provenientes do EFCAD fornecem forças em N/m uma vez que são cálculos em 2D. Dessa forma se faz necessário multiplicar as forças pela profundidade da peça móvel que é de 67 mm.

Mais uma vez foram realizados cálculos estáticos para diversos valores de deslocamento da peça móvel e para diferentes valores de densidade de corrente imposta na bobina. Calculam-se primeiramente as forças de atração da armadura dos lados direito e esquerdo separadamente e, em seguida, obtém-se a resultante dessas forças para os dois movimentos possíveis da peça móvel.

A força que se cria à direita (e que atrai a armadura para este lado) é denominada  $F_d$ , ao passo que a força  $F_e$ , devida aos campos que se estabelecem no entreferro à esquerda, atrai a peça neste sentido.

Na Figura 2.14 tem-se as forças  $F_d$  e  $F_e$  indicadas para três valores diferentes de densidade de corrente (J) impostos na bobina quando se desejou o movimento da peça móvel para a esquerda.

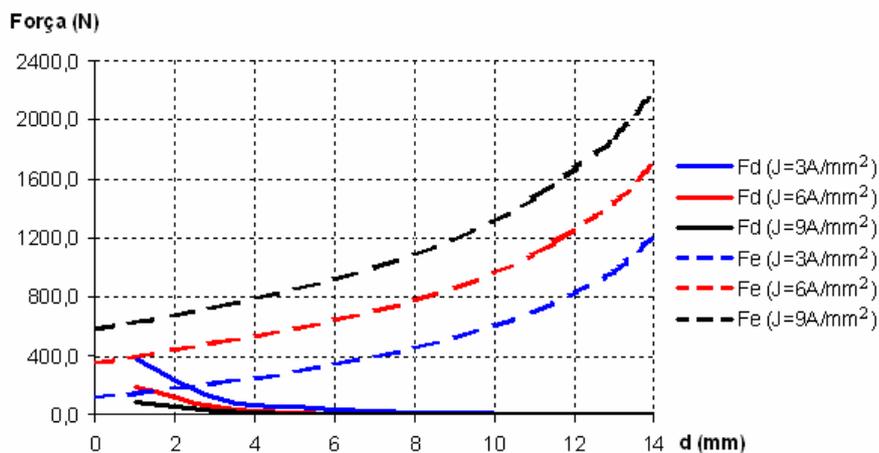


Figura 2.14 Forças em função do deslocamento para o lado esquerdo.

Pode-se observar através deste gráfico que quanto mais a peça móvel se aproxima do lado esquerdo do atuador, maior é a força de atração neste sentido e menor é a força de atração no sentido oposto. Este fato está coerente com o método do Tensor de Maxwell, empregado no cálculo, no qual a força no entreferro é inversamente proporcional ao quadrado do comprimento do mesmo.

Após o cálculo das forças de atração tanto do lado esquerdo como do lado direito da peça móvel, foram obtidas as forças resultantes na estrutura através da diferença  $F_e - F_d$ . O sinal negativo indica que a força resultante é contrária ao sentido do movimento. O gráfico referente a essas forças resultantes pode ser visto na Figura 2.15 onde percebe-se que um aumento no valor da corrente na bobina sempre irá favorecer o movimento no sentido desejado

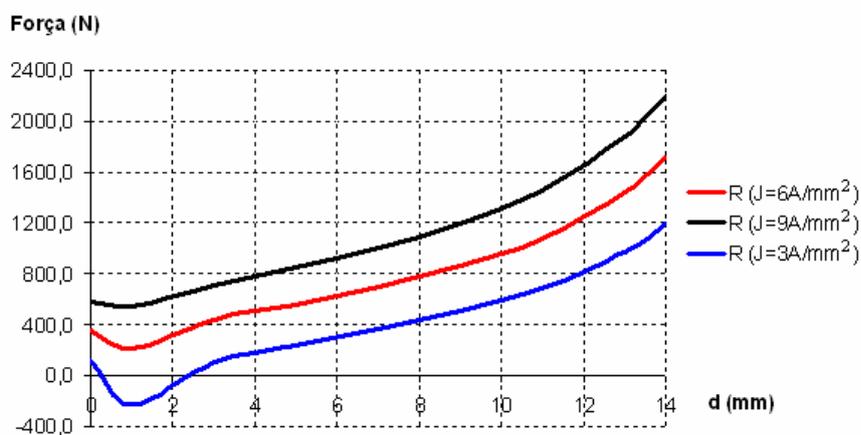


Figura 2.15 Forças resultantes em função do deslocamento para o lado esquerdo.

O mesmo procedimento foi realizado para o cálculo das forças para o movimento oposto, ou seja, da esquerda para a direita. A Figura 2.16 mostra as forças dos lados direito e esquerdo calculadas separadamente e a Figura 2.17 mostra as forças resultantes calculadas agora pela diferença  $F_d - F_e$ .

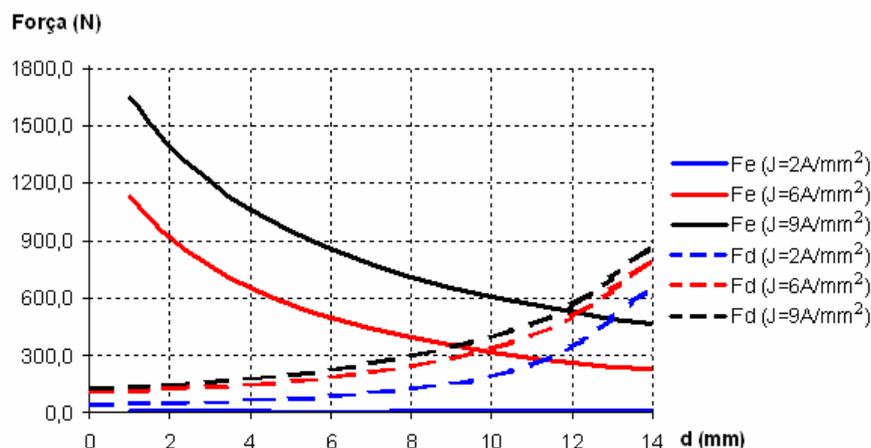


Figura 2.16 Forças em função do deslocamento para o lado direito.

Da mesma forma que no movimento anterior, as forças no sentido do deslocamento tendem a aumentar enquanto as do sentido oposto tendem a diminuir, pelo mesmo motivo já explicado.

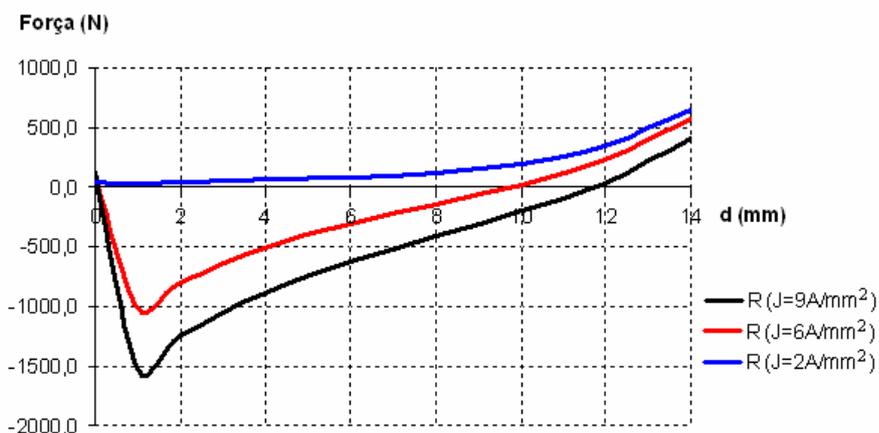


Figura 2.17 Forças resultantes em função do deslocamento para o lado direito.

Ao contrário do que foi visto no movimento anterior, neste segundo caso, o aumento na corrente não garante o aumento nas forças no sentido do movimento. Tal fato está bem explicitado na Figura 2.17 onde se pode ver o surgimento de uma força resultante no sentido oposto ao movimento (sinal negativo) para os valores maiores de densidade de corrente.

Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de que para realizar o movimento para o lado direito, é necessário que o fluxo magnético criado pela bobina seja capaz de anular o fluxo do ímã do lado esquerdo do atuador e produzir um fluxo considerável no lado direito. Isso ocorre para um determinado valor de densidade de corrente relativamente pequeno e caso esta corrente seja demasiadamente alta o comportamento desejado não ocorre.

Para os cálculos de forças aqui realizados observou-se que o valor de densidade de corrente mais adequado para o movimento para a direita foi de  $J=2A/mm^2$ . Este valor fornece forças de intensidades menores que no primeiro movimento

Sendo assim uma solução que pode ser adotada para diminuir a dificuldade de realização do movimento para a direita é a inserção de uma mola externa ao atuador que contribua para este movimento. Deve-se ficar atentos para que a força produzida pela mola não exceda a força produzida pelos ímãs no momento em que a armadura se encontra fixa do lado esquerdo do atuador.

## Capítulo 3

### PARTE EXPERIMENTAL

Foi projetado e implementado um protótipo do atuador em estudo com a finalidade de estudar o seu comportamento real. Com um protótipo devidamente montado no laboratório sabe-se com exatidão todos os dados construtivos que o atuador possui e tais dados serão de grande importância para se tirar conclusões comparativas entre resultados práticos e simulados.

Além disso, com a construção de um protótipo, pode-se deparar com dificuldades ou facilidades na implementação dessa estrutura que não foram previamente previstas em estudos teóricos. O conhecimento desses aspectos construtivos pode agregar informações importantes para que posteriormente sejam tomadas decisões em relação ao projeto de novos atuadores.

Com o protótipo devidamente construído é necessário que se desenvolva uma bancada experimental para que o atuador funcione adequadamente e para que se possa adquirir dados experimentais capazes de serem comparados com dados simulados.

Neste capítulo primeiramente será explicada a metodologia empregada para o projeto do protótipo bem como suas características construtivas. A seguir será comentado sobre a bancada implementada para os testes neste protótipo e por último será explanado a respeito dos dados que são adquiridos pela bancada do atuador em questão.

### 3.1 O Projeto do Protótipo

#### 3.1.1 *Metodologia para a Confecção do Protótipo*

O primeiro passo para se projetar um protótipo foi realizar um estudo em um atuador já existente. Tal estudo foi feito no Capítulo 2, onde partiu-se da teoria de cálculos de campos para se analisar o comportamento magnético do equipamento e em seguida efetuar cálculos de forças para se ter uma noção do comportamento e dos valores das forças de atração para diversos valores de densidade de corrente.

Feito o estudo preliminar, procurou-se projetar um protótipo mantendo as mesmas características de funcionamento do atuador já existente, porém com dimensões menores. Devido aos equipamentos disponíveis no laboratório, foi mais viável a construção de uma bancada experimental para atender as necessidades de um protótipo pequeno do que de um atuador maior.

Dessa forma foram feitos diversos cálculos de campos e de forças para algumas dimensões propostas para o protótipo até que fosse decidido por um atuador em particular. Os cálculos de campos e de forças realizados para o protótipo serão mostrados em breve. Após serem escolhidas as dimensões do protótipo a ser construído, foram adquiridas as peças para sua construção, ou seja, os ímãs permanentes, chapas de aço, mola, entre outros materiais.

Devido à dificuldade em encontrar no mercado chapas de aço e ímãs com as dimensões exatamente iguais àsquelas projetadas, teve-se que adequar o nosso projeto às disponibilidades de materiais existentes no mercado de forma que as características de operação do atuador não fossem prejudicadas.

O próximo passo foi escolher um ateliê capaz de fazer todo o processo de usinagem dos materiais comprados para que se pudesse montar o atuador. Com os materiais devidamente usinados foi construída uma bobina por uma empresa especializada para que se pudesse ter o maior aproveitamento possível do espaço reservado para a mesma.

Com o protótipo devidamente montado foram realizados testes para confirmar seu funcionamento. A Figura 3.1 mostra uma foto do protótipo construído.

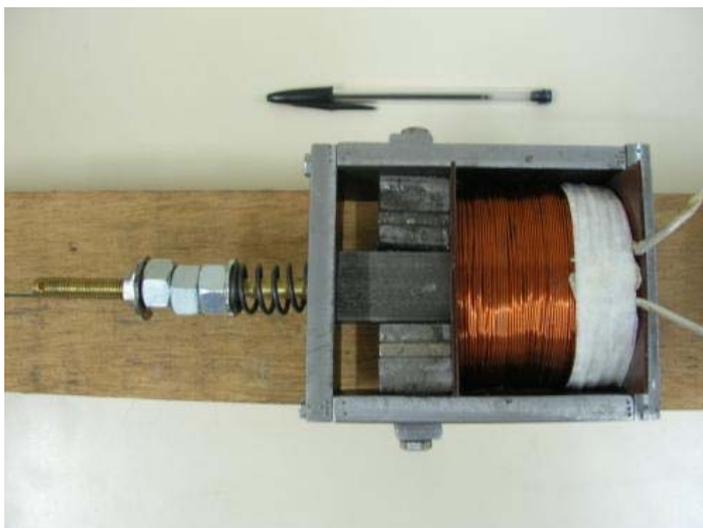


Figura 3.1 Foto do protótipo construído.

### 3.1.2 Dados Técnicos

A seguir serão fornecidas algumas informações referentes às características físicas e construtivas do protótipo.

- Parte estacionária e armadura: aço 1045.
- Peça cilíndrica fixa à armadura: latão maciço.
- Buchas para deslizamento da peça cilíndrica: bronze grafitado.
- Ímãs permanentes de NdFeB: Br (remanência) = 12800 Gauss.

Hc (coercividade) = 11500 Oersted.

Bhmáx (produto de energia) = 42MGOe.

- Bobina: fio de cobre esmaltado AWG nº 20.

Número de espiras = 1540

- Mola de compressão: constante de elasticidade  $k = 6,15\text{N/mm}$  (valor obtido experimentalmente).

As dimensões empregadas na construção do protótipo e também para a realização dos cálculos pelo MEF são apresentadas na Figura 3.2.

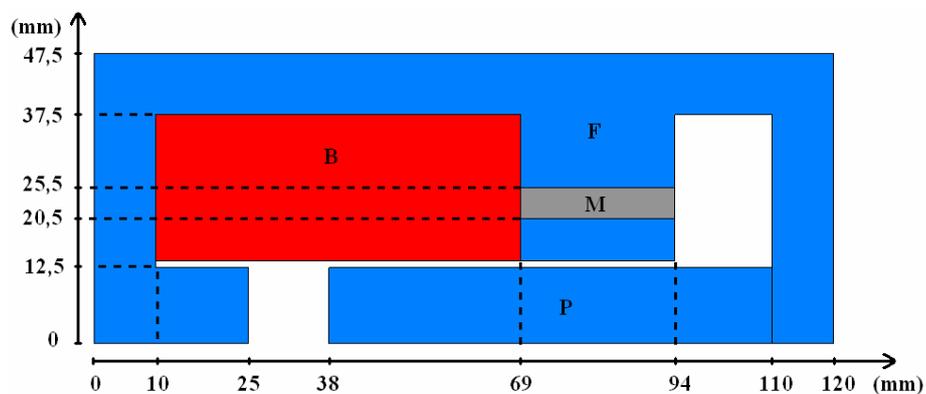


Figura 3.2 Dimensões empregadas no protótipo.

Além das dimensões acima apresentadas, foram utilizadas as seguintes dimensões para as profundidades das peças:

- Profundidade da peça P = 25mm.
- Profundidade das chapas laterais = 60mm.
- Profundidade dos ímãs = 40mm.

### 3.1.3 Cálculos pelo MEF

No **Capítulo 2** foram realizados cálculos de campos e de forças em um domínio de estudo com dimensões referentes a um atuador já existente. Naquele momento o objetivo era estudar o princípio de funcionamento de um atuador real para se adquirir conhecimento acerca de seu comportamento.

Neste capítulo foram realizados os mesmos cálculos, entretanto com a finalidade de comparar os resultados obtidos pelo protótipo e pelo atuador encontrado no mercado, pois a intenção era criar um protótipo do atuador já existente fazendo com que suas características fossem preservadas.

Os cálculos aqui mostrados foram novamente feitos com a ajuda do programa EFCAD e foram realizados os mesmos procedimentos anteriormente executados, ou seja, primeiramente utilizou-se a mesma malha para todos os cálculos, em seguida foram feitos cálculos de distribuição de campos para diversos valores de deslocamento da peça móvel e de densidade de corrente. Por fim foram calculadas as forças de atração nos entreferros tanto para o movimento em um sentido como no sentido oposto.

Na Figura 3.2 pode-se ver as dimensões do protótipo as quais foram utilizadas nos cálculos 2D e na Figura 3.3 encontra-se a malha utilizada para tais cálculos.

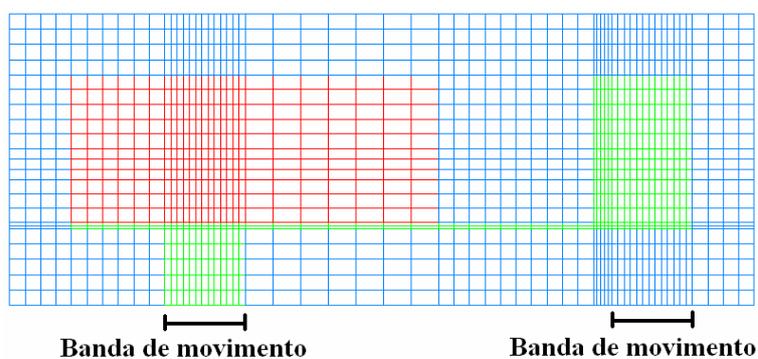


Figura 3.3 Malha para os cálculos na estrutura referente ao protótipo construído.

Como já foi dito anteriormente foram realizados cálculos estáticos para diversos espaçamentos da peça móvel e para alguns valores de densidade de corrente. A Figura 3.4 mostra alguns resultados para as distribuições de campos magnéticos quando a peça móvel faz o movimento da direita para a esquerda. Nestes cálculos foi utilizada uma densidade de corrente de  $6\text{A/mm}^2$ .

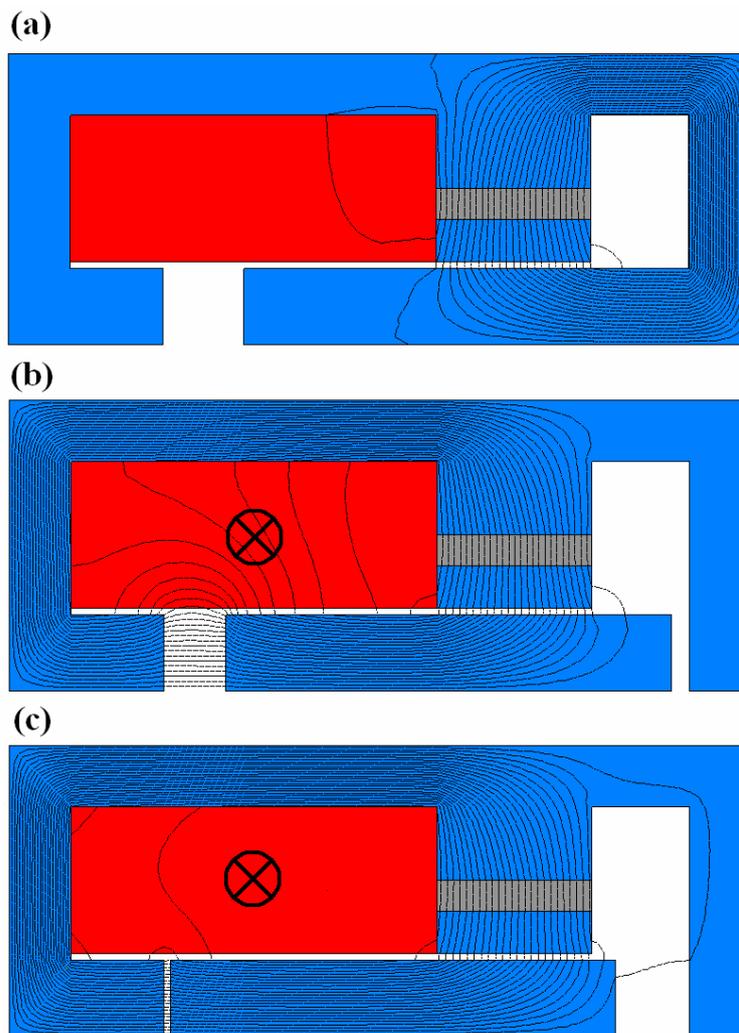


Figura 3.4 Distribuição do campo magnético no protótipo: (a) somente do ímã com a peça móvel à direita, (b) para um deslocamento de 3 mm para a esquerda considerando o ímã e a bobina, (c) para um deslocamento de 12 mm para a esquerda considerando o ímã e a bobina.

Pode-se perceber que os resultados obtidos para esse movimento estão coerentes com o princípio de funcionamento do atuador e também seguem a mesma tendência do comportamento do atuador anteriormente estudado. Na Figura 3.4(a) onde a bobina não se apresenta excitada percebe-se que há uma grande concentração de linhas de campo magnético do lado direito do atuador fazendo com que a armadura se encontre fixa deste lado.

Com a presença de corrente na bobina, Figura 3.4(b)-(c), a concentração de linhas de campo magnético passa a ser maior no lado esquerdo atraindo a armadura para este lado.

A seguir (Figura 3.5) são apresentados os resultados dos cálculos de campos para o movimento oposto.

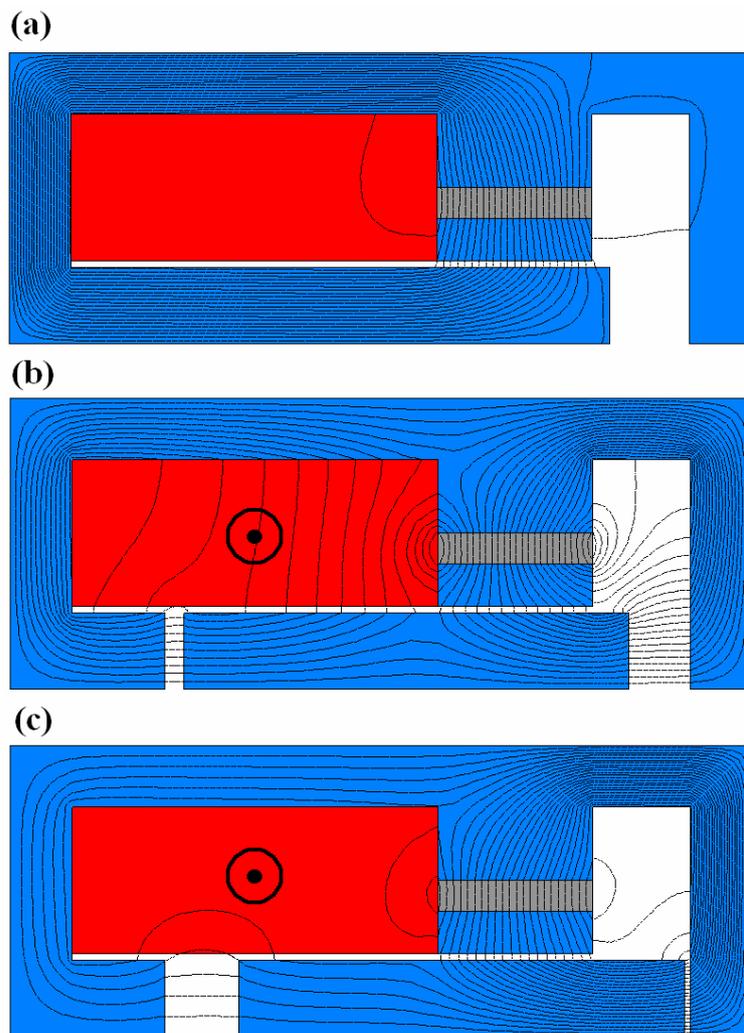


Figura 3.5 Distribuição do campo magnético no protótipo: (a) somente do ímã com a peça móvel à esquerda, (b) para um deslocamento de 3 mm para a direita considerando o ímã e a bobina, (c) para um deslocamento de 12 mm para a direita considerando o ímã e a bobina.

Assim como o que ocorreu com o movimento anterior, os resultados obtidos aqui estão coerentes com o princípio de funcionamento do atuador e também com os resultados obtidos anteriormente para o atuador encontrado no mercado.

Similarmente ao que já foi visto, pode-se observar o comportamento das linhas de campo magnético sendo concentradas do lado esquerdo do atuador quando não há corrente na bobina (Figura 3.5(a)) e a concentração das mesmas na outra extremidade quando a bobina é excitada, Figura 3.5(b)-(c). Nos cálculos para o segundo movimento mais uma vez utilizou-se o valor de  $J = 2A/mm^2$ .

Após serem efetuados os cálculos de campos magnéticos pelo MEF, foram realizados os cálculos de forças magnéticas através do método do Tensor de Maxwell, novamente com o auxílio do programa EFCAD.

Assim como realizado no Capítulo 2 foram calculadas primeiramente as forças nas extremidades esquerda ( $F_e$ ) e direita ( $F_d$ ) da armadura e em seguida foram calculadas as forças resultantes em ambos os sentidos do movimento da peça móvel. As forças resultantes do movimento da direita para a esquerda foram calculadas fazendo-se  $F_e - F_d$  e para o movimento oposto utilizou-se  $F_d - F_e$ .

Os resultados obtidos para o movimento da esquerda para a direita podem ser vistos nas figuras 3.6 e 3.7.

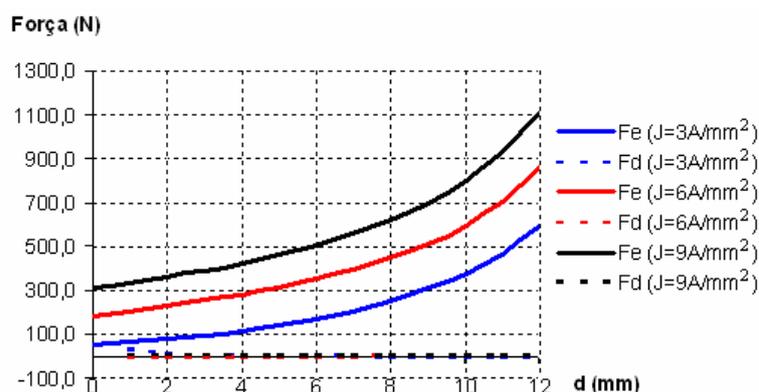


Figura 3.6 Forças em função do deslocamento para o lado esquerdo.

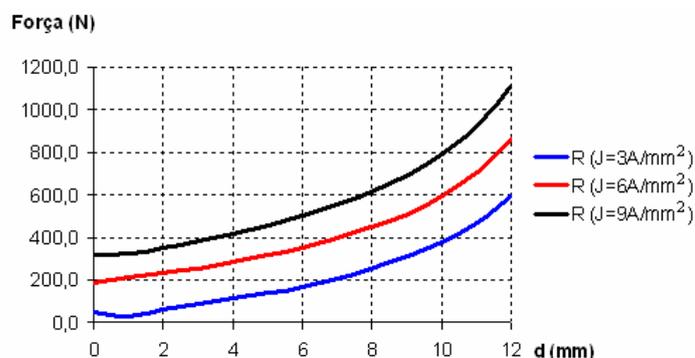


Figura 3.7 Forças resultantes em função do deslocamento para o lado esquerdo.

Os resultados obtidos para os cálculos simulando as dimensões do protótipo projetado em laboratório encontram-se dentro do esperado. Pode-se perceber que o comportamento das curvas aqui apresentadas é semelhante ao das curvas presentes no Capítulo 2. As diferenças encontradas entre os resultados do protótipo e do atuador anteriormente simulado estão nos valores das forças de atração e no curso total do deslocamento da armadura.

Tal fato já era esperado, uma vez que o atuador projetado é menor, requerendo menor corrente de excitação e produzindo menores forças magnéticas nos seus entreferros. Isto fornece características favoráveis para a implementação de uma bancada em laboratório com proporções menores do que a necessária para se fazer testes em um atuador de dimensões maiores.

A seguir, (figuras 3.8 e 3.9) podem ser vistos os resultados para os cálculos de forças no outro sentido do movimento.

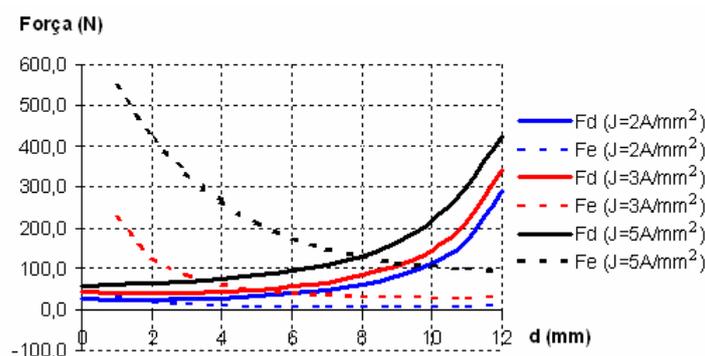


Figura 3.8 Forças em função do deslocamento para o lado direito.

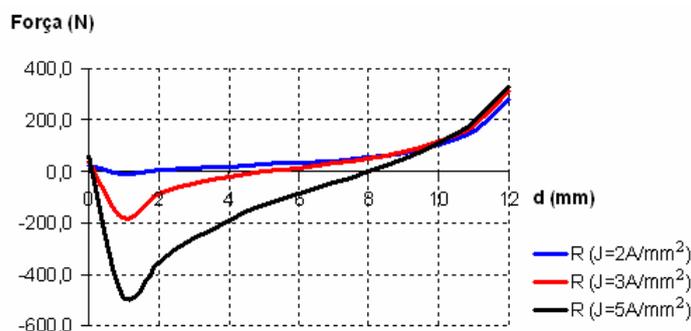


Figura 3.9 Forças resultantes em função do deslocamento para o lado direito.

Os resultados apresentados para o segundo movimento também estão de acordo com o esperado e o que já foi visto anteriormente. Observam-se novamente forças magnéticas com valores menores em relação ao atuador maior simulado anteriormente e um comportamento qualitativamente similar entre os dois atuadores.

Pode-se observar novamente o fato de que é necessária a utilização de uma densidade de corrente relativamente menor para o segundo movimento do que para o primeiro. E como este fato faz com que o segundo movimento seja causado por forças

magnéticas menores que o primeiro, há a necessidade de se adicionar uma mola externa ao atuador para ajudar na realização do movimento em questão.

### **3.2 A Bancada Experimental**

Para que o atuador funcione corretamente deve-se ter uma bancada em que haja uma fonte de corrente capaz de excitar a sua bobina nos dois sentidos. Além disso, precisa-se medir corrente e tensão na bobina de forma que se possa visualizar o comportamento dinâmico desses parâmetros. É importante também que se saiba o tempo necessário para que a armadura realize ambos os movimentos e a força a qual o eixo móvel é capaz de se opor.

Tendo isso em mente montou-se uma bancada para o protótipo construído. Nesta bancada fixou-se o atuador em um suporte de madeira nas extremidades desse suporte colocaram-se duas roldanas.

As roldanas têm como papel guiar uma corda que foi amarrada, por uma extremidade ao eixo móvel do atuador, e em outra alguns pesos para simular uma força oposta ao movimento.

A bobina é alimentada por uma fonte de corrente contínua e para que se possa inverter o sentido da tensão aplicada na bobina, foi construída uma chave comutadora no suporte de madeira.

Mede-se simultaneamente corrente e tensão em dois canais de um osciloscópio (2430A 150MHz da Tectronix). Os dados medidos são adquiridos por uma placa General Purpose Interface Bus (GPIB) ANSI/IEEE Standard 488.1-1987 [23] presente em um microcomputador e tratados através de um programa desenvolvido em LabView [24].

A corrente é medida por uma sonda de corrente por efeito “hall” (ponteira de corrente A6302 da Tectronix, acoplada ao amplificador TM 502A, também da Tectronix)

A Figura 3.10 mostra a foto da bancada.



Figura 3.10 Foto da bancada experimental construída.

### 3.3 Dados Adquiridos

#### 3.3.1 Aquisição pelo Osciloscópio

Como já foi dito anteriormente os dados importantes neste estudo são: a força que o atuador é capaz de vencer, o tempo que a armadura leva para realizar todo o deslocamento, o comportamento da corrente e a tensão aplicada na bobina.

Para que se possa medir o tempo do movimento da armadura utilizou-se a função *trigger* do osciloscópio. Com esta função consegue-se a visualização do comportamento dinâmico dos sinais de corrente e tensão. Os sinais observados no osciloscópio são adquiridos pelo computador, o qual possui um programa desenvolvido em LabView [24] e que permite analisar com mais profundidade as características dos dados adquiridos, ou seja, pode-se escolher apenas a parte do sinal que interessa e medir a corrente de pico, o tempo do movimento da armadura e a amplitude da tensão.

Nas figuras 3.11 e 3.12 pode-se ver primeiramente uma foto dos sinais de corrente e tensão visualizados no osciloscópio e em seguida as mesmas curvas após serem adquiridas pelo computador. Pode-se observar que na interface do computador há diversas caixas de textos com a função de fornecer alguns resultados de forma mais direta do que quando medidos em osciloscópio e, além disso, há a possibilidade de armazenar em arquivo os dados referentes aos sinais medidos.

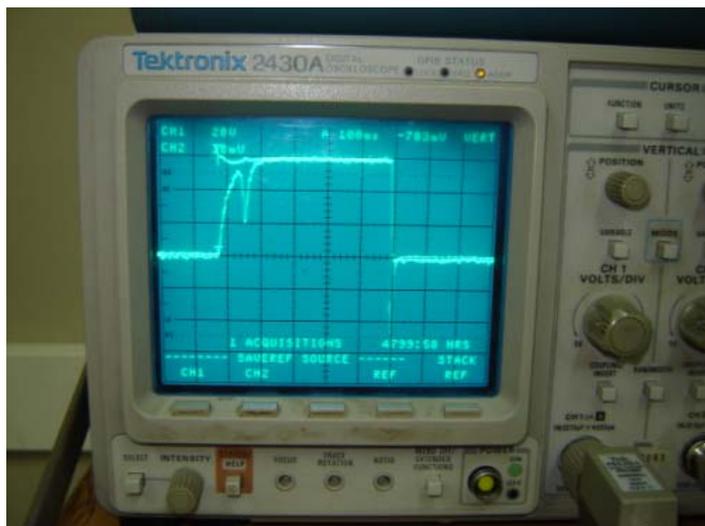


Figura 3.11 Foto da tela do osciloscópio com os sinais de corrente e tensão adquiridos.

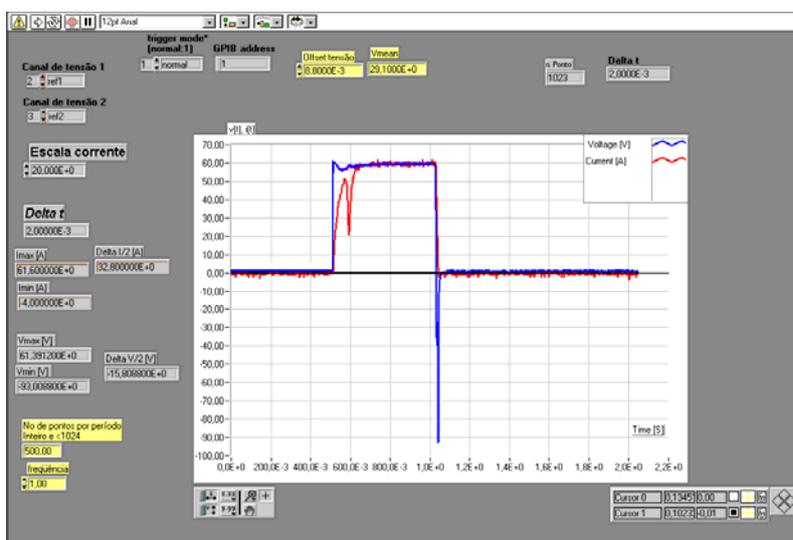


Figura 3.12 Painel de controle do programa desenvolvido em LabView.

### 3.3.2 Análise Qualitativa das Curvas Obtidas

Para uma melhor compreensão das curvas de corrente e tensão apresentadas nas figuras 3.11 e 3.12, elas serão representadas na Figura 3.13 com alguns pontos de operação numerados com a finalidade de se explicar melhor o comportamento dessas grandezas.

Os eixos foram propositalmente retirados pelo fato de que a intenção aqui é analisar apenas o formato das curvas e não os valores de tensão e corrente.

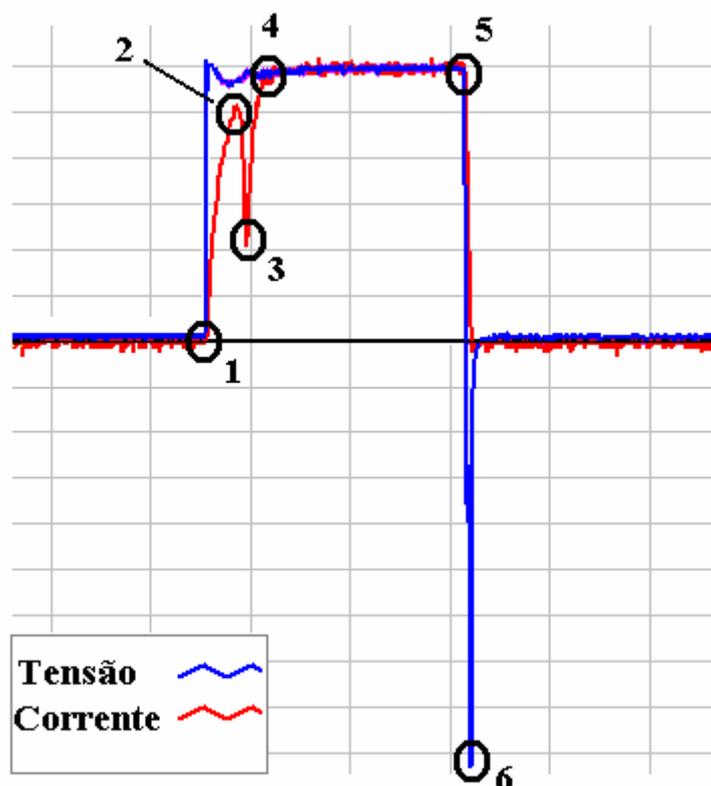


Figura 3.13 Curvas de corrente e tensão para análise qualitativa.

De acordo com a Figura 3.13 pode-se perceber que em 1 ocorre o acionamento manual da chave para aplicar tensão na bobina; neste momento a tensão na bobina, antes nula, muda para um determinado valor.

Entre 1 e 2 a corrente na bobina aumenta de acordo com a lei de Ohm. Simultaneamente ocorre uma pequena queda no valor da tensão pelo fato de a fonte de corrente não conseguir estabilizar a tensão instantaneamente.

Em 2 a corrente atinge um determinado valor necessário para realizar o movimento da armadura. Este valor varia de acordo com a tensão que se aplica na bobina, bem como com a força contrária imposta ao movimento da armadura. Dessa forma, entre 2 e 3 a armadura está em movimento e exatamente em 3 seu movimento é finalizado.

Pode-se perceber que durante o movimento da armadura a corrente na bobina diminui enquanto que a tensão aumenta ligeiramente estabilizando-se no valor desejado.

O intervalo de tempo entre 1 e 3 é considerado como sendo o tempo total necessário para que a armadura realize o seu deslocamento. Dessa forma a partir de 3 pode-se extinguir a tensão de alimentação da bobina a qualquer momento.

No caso do protótipo construído no laboratório, para que a tensão seja extinta na bobina é necessário desligar manualmente uma chave. Dessa forma leva-se um tempo muito grande para que a tensão se torne nula, pois é necessário visualizar quando o movimento da armadura é cessado e isto depende da rapidez do reflexo humano para o desligamento da chave.

Entretanto em atuadores comerciais há sensores para identificar o posicionamento da armadura e circuitos eletrônicos que realizam as operações de aplicar tensão na bobina ou cessá-la de forma quase instantânea.

Assim sendo, como não foi possível extinguir a tensão imediatamente após 3, entre 3 e 4 a corrente na bobina voltou a crescer até se estabilizar em um valor em 4. Entre 4 e 5 se tem tensão e corrente constantes, ou seja, um comportamento puramente resistivo da bobina. Em 5 a chave é acionada manualmente para cessar a tensão na bobina e neste instante ocorre um pico de tensão negativo (que pode ser visto em 6) devido ao transitório da chave.

Finalmente, após 6 tanto a tensão como a corrente se anulam na bobina.

Assim sendo, de acordo com a explicação acima, pode-se perceber que as partes das curvas que interessa estão entre 1 e 3, pois é o intervalo de tempo necessário para ocorrer o deslocamento da armadura a partir do instante em que é aplicada tensão na bobina.

### **3.3.3 *Análise Quantitativa das Curvas Obtidas***

Para se analisar experimentalmente a relação entre alguns parâmetros desejados, foram obtidas diversas curvas de corrente variando-se a tensão imposta na bobina e/ou a força contrária ao movimento da armadura. As curvas de tensão têm como finalidade apenas a indicação do valor da tensão imposta na bobina; já através das curvas de corrente pode-se medir o tempo total do movimento da armadura.

Dessa forma, primeiramente foram feitas medidas para o movimento principal da armadura, ou seja, o movimento no qual o atuador agiria no sentido de abrir um circuito elétrico devido a uma falta na rede, por exemplo. Para este movimento, os dados obtidos podem ser observados no gráfico da Figura 3.14.

Para a realização desse gráfico foram adquiridas curvas de corrente variando-se a tensão na bobina de 50 a 90 V e a força contrária ao movimento foi variada de 0 a 192 N.

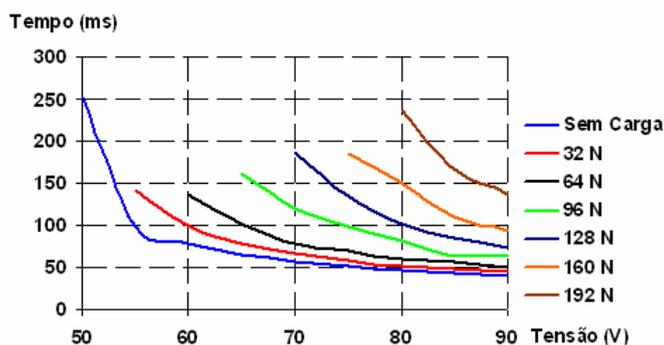


Figura 3.14 Verificação do tempo do movimento principal em função da tensão da bobina e da carga da armadura.

Pode-se observar que com o aumento da tensão na bobina tem-se uma diminuição do tempo necessário para a armadura fazer o seu deslocamento. Além disso, aumentando-se a força contrária ao movimento da armadura ocorre um aumento do tempo considerado. Entretanto, vale ressaltar que não se pode aumentar indefinidamente a tensão na bobina porque isto causaria um aumento muito grande na sua corrente, podendo danificar o condutor de cobre.

Para a obtenção da Figura 3.15, foram realizados os mesmos procedimentos para a obtenção do gráfico anterior, porém para o movimento oposto ao primeiro. Para esta nova situação, um aumento na tensão da bobina nem sempre favorece o movimento, como já explicado em capítulos anteriores. Dessa forma o gráfico considera uma pequena parcela de valores de força e tensão aplicados experimentalmente porque para valores fora desse conjunto o atuador não funciona corretamente.

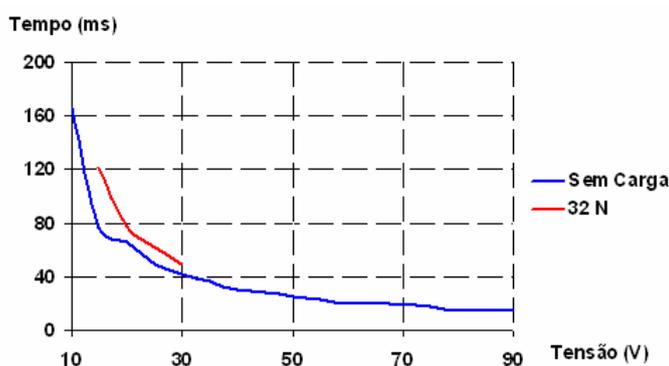


Figura 3.15 Verificação do tempo do movimento reverso em função da tensão da bobina e da carga da armadura.

Percebe-se, a partir dos gráficos acima, as limitações quando se deseja que o atuador efetue o movimento reverso. Ou seja, para este movimento o atuador depende de um

intervalo pequeno de tensão para funcionar corretamente e é capaz de se opor a uma força pequena.

Entretanto analisando-se em termos da função que cada movimento possui no seu contexto pode-se perceber que o primeiro deslocamento é mais importante pelo fato de que será o instante em que se faz necessária a interrupção de um circuito elétrico por um disjuntor. Já o movimento oposto do atuador irá apenas colocar o disjuntor em sua posição inicial.

A análise quantitativa realizada neste capítulo foi de extrema importância para se efetuar a comparação dos dados simulados com os dados experimentais aqui obtidos. De fato, os fatores que não forem considerados na simulação dinâmica do atuador, como por exemplo as correntes induzidas, estão sendo, naturalmente, considerados nos resultados experimentais. Dessa forma, uma calibração dos resultados simulados baseando-se nos resultados experimentais aqui apresentados aproxima os dados simulados dos dados reais.

## Capítulo 4

# SISTEMA PARA PROJETO DE ATUADORES

Será visto neste capítulo como o sistema computacional está organizado, ou seja, serão apresentados os módulos que o compõem, bem como a funcionalidade dos mesmos e métodos utilizados para os cálculos em cada módulo.

Em seguida, serão mostradas as equações envolvidas no processo de simulação do comportamento dinâmico do atuador, assim como duas maneiras de se obter os parâmetros da estrutura necessários para tal simulação. A primeira utiliza o Método de Elementos Finitos e a segunda, as equações analíticas em substituição ao MEF.

Por último, serão apresentados alguns resultados referentes às simulações dinâmicas e uma comparação com dados experimentais.

### 4.1 Os Módulos do Programa

Será denominado módulo do programa um conjunto de funções e cálculos que o sistema computacional efetua com um objetivo específico e utilizando uma determinada entrada de dados escolhida pelo usuário.

O programa desenvolvido possui três formas distintas de interagir com o usuário:

- **Módulo 1** – O usuário insere, como dados de entrada, a força oposta ao movimento da armadura ( $F_{ext}$ ) e o tamanho do percurso da armadura ( $d_{max}$ ). O programa exibe como resposta as dimensões do atuador e os resultados da simulação dinâmica do mesmo.
- **Módulo 2** – O usuário escolhe as dimensões do atuador e o programa exibe como resposta a força que o atuador é capaz de se opor, bem como os resultados da simulação dinâmica do atuador em questão.
- **Módulo 3** – O usuário pode abrir um arquivo previamente salvo e fazer modificações nas dimensões ou nos parâmetros de um atuador anteriormente projetado.

Para uma melhor compreensão de cada módulo observe o diagrama de blocos a seguir, o qual mostra um panorama geral das etapas de cálculos que são efetuadas para chegar aos resultados finais a partir dos dados de entrada inseridos pelo usuário.

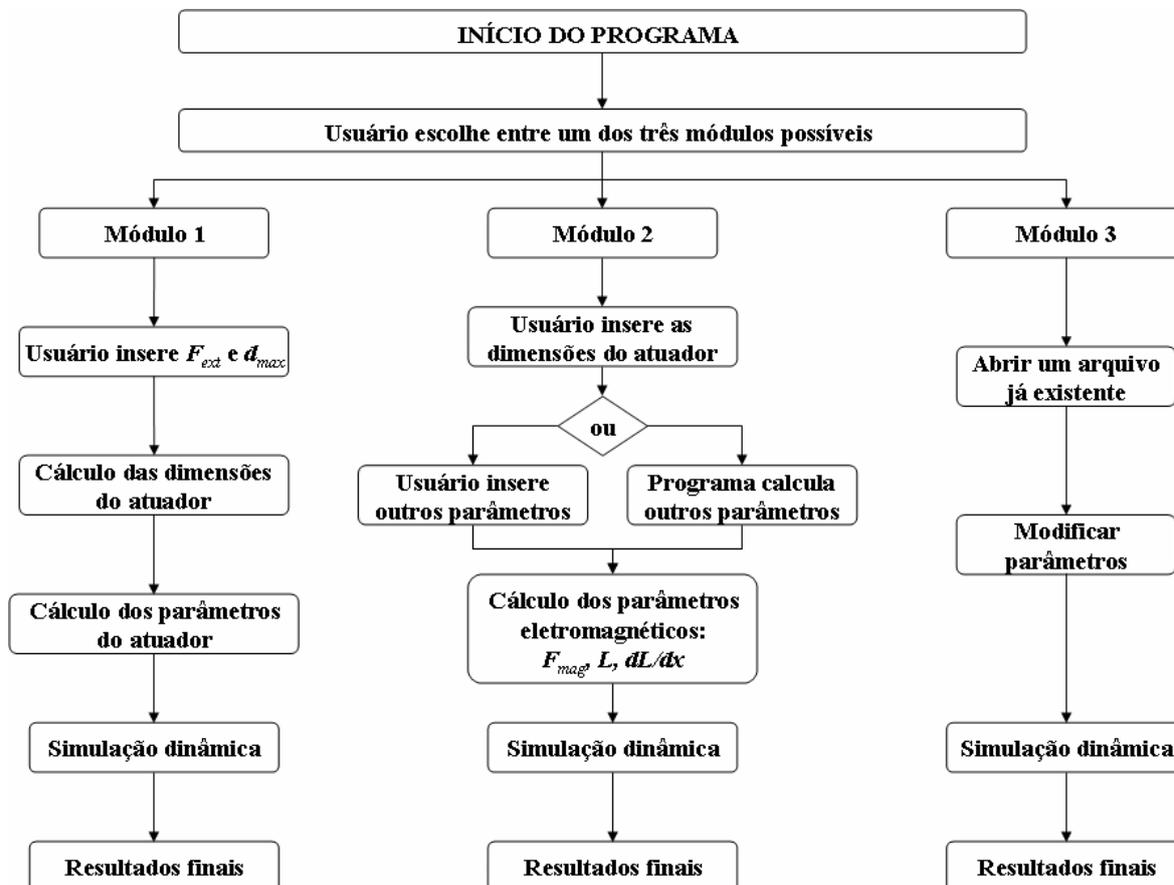


Figura 4.1 F Fluxograma do sistema computacional.

A seguir serão mostradas com mais detalhes as formas de cálculo utilizadas em cada uma das etapas presentes no fluxograma acima. Basicamente o que difere entre o Módulo 1 e o Módulo 2 é a forma com que se chega até as dimensões do atuador. Com as dimensões do atuador pré-determinadas, os cálculos dos demais parâmetros praticamente não diferem.

#### 4.1.1 Módulo 1

Neste item será visto como o dimensionamento do atuador é obtido a partir dos dois parâmetros inseridos pelo usuário: a força externa requerida para o atuador vencer ( $F_{ext}$ ) e um determinado deslocamento máximo da armadura ( $d_{max}$ ).

Para relacionar  $F_{ext}$  e  $d_{max}$  com as dimensões do atuador, partiu-se do fato que a força de retenção do ímã ( $F_i$ ) quando a armadura se encontra posicionada em uma das extremidades da estrutura, deve ser uma parcela da força solicitada pelo usuário ( $F_{ex}$ ).

Considerando essa situação onde a armadura apresenta-se em repouso em uma das extremidades e não há corrente circulando pela bobina, será encontrado o equacionamento para o cálculo da força magnética para tal caso.

São efetuadas algumas considerações antes de começar a abordagem do problema:

- Primeiramente considera-se que  $\mu_f \gg \mu_0$ , o que significa que o campo magnético no ferro é desprezível em relação aos campos nos entreferros.
- O campo nos entreferros é considerado constante e sem espraiamento nas suas bordas.
- Serão utilizadas as notações “ $S$ ” para indicar a secção transversal do entreferro, “ $e$ ” para o comprimento do entreferro. O número entre parênteses indica o número do entreferro.

Dessa forma, por exemplo, o campo magnético criado apenas pela bobina no entreferro 1 será notado por  $h_1^b$  e o campo magnético criado apenas pelo ímã no entreferro 1 será  $h_1^i$ .

A Figura 4.2 indica as notações utilizadas para cada dimensão do atuador:

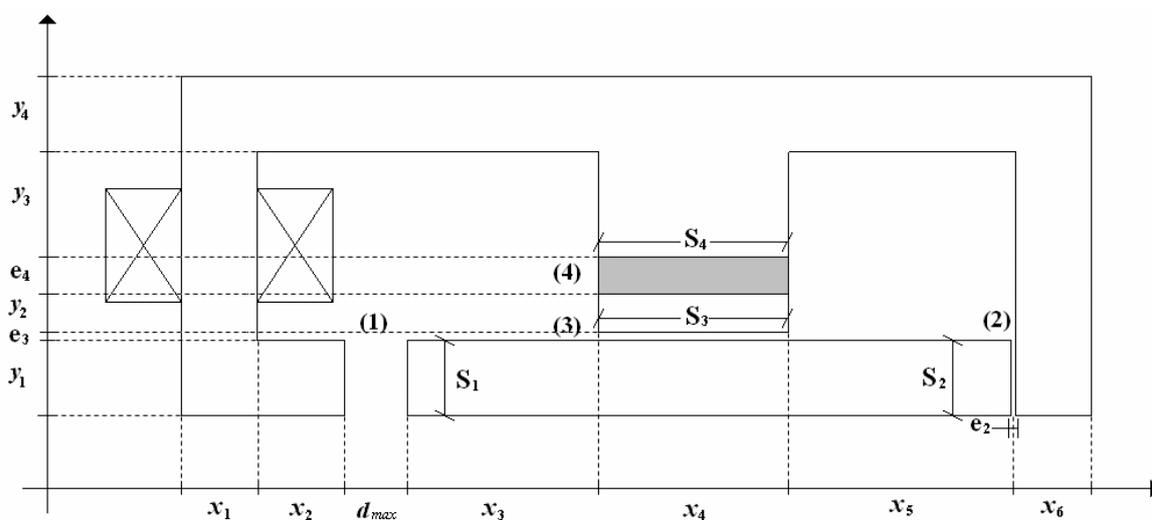


Figura 4.2 Notações adotadas para o dimensionamento do atuador.

Ainda com relação às notações considera-se que:  $S_1 = S_2 = y_1 p_1$ ,  $S_3 = x_4 p_1$  e  $S_4 = x_4 p_2$ , onde  $p_1$  e  $p_2$  são as dimensões das profundidades da armadura e do ímã respectivamente.

Considerando as notações da Figura 4.2 e o circuito da Figura 4.3 calcula-se a força de retenção do ímã quando a armadura se encontra totalmente à direita e sem a presença de corrente na bobina.

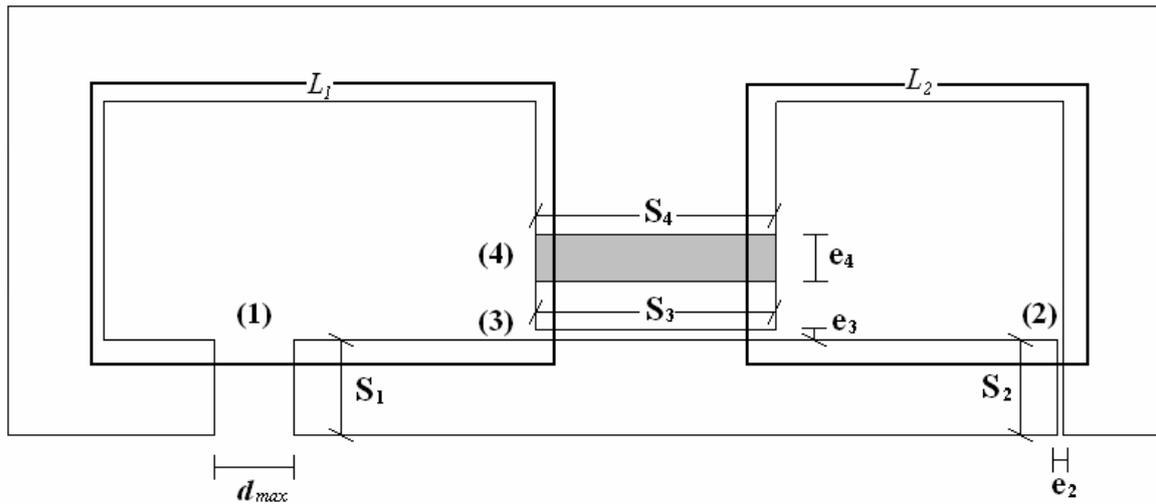


Figura 4.3 Circuito magnético para o cálculo da força de retenção do ímã.

Para o circuito acima foi observado através do software EFCAD que o fluxo referente ao caminho  $L_1$  é muito menor que o fluxo do caminho  $L_2$ , dessa forma será considerado apenas o caminho  $L_2$ .

Escrevendo as equações de circulação de campos e conservação de fluxos para este caso:

$$H_i e_4 + h_3^i e_3 + h_2^i e_2 = 0 \quad (3.1)$$

$$\phi_i = \phi_3 \quad (3.2)$$

$$B_i x_4 p_2 = \mu_0 h_3^i x_4 p_1$$

$$\phi_3 = \phi_2 \quad (3.3)$$

$$\mu_0 h_3^i x_4 p_1 = \mu_0 h_2^i y_1 p_1$$

Escrevendo ainda a equação referente à curva característica do ímã:

$$B_i = \mu_0 H_i + B_r \quad (3.4)$$

As equações (3.2) e (3.3) podem ser escritas, respectivamente, como:

$$B_i = \mu_0 h_3^i \frac{p_1}{p_2} \quad (3.5)$$

$$h_3^i = h_2^i \frac{y_1}{x_4} \quad (3.6)$$

Substituindo (3.5) em (3.4):

$$\mu_0 h_3^i \frac{p_1}{p_2} = \mu_0 H_i + B_r \quad (3.7)$$

Substituindo (3.6) em (3.7) e isolando o termo  $H_i$ :

$$H_i = h_2^i \frac{y_1 p_1}{x_4 p_2} - \frac{B_r}{\mu_0} \quad (3.8)$$

Substituindo as equações (3.6) e (3.8) em (3.1):

$$\left( h_2^i \frac{y_1 p_1}{x_4 p_2} - \frac{B_r}{\mu_0} \right) e_4 + h_2^i \frac{y_1}{x_4} e_3 + h_2^i e_2 = 0 \quad (3.9)$$

Que pode ser reescrita como:

$$h_2^i = \frac{B_r e_4}{\mu_0} \frac{1}{\left( \frac{y_1 p_1}{x_4 p_2} e_4 + \frac{y_1}{x_4} e_3 + e_2 \right)} \quad (3.10)$$

Com a equação (3.10) do campo magnético produzido pelo ímã definida, a próxima etapa é calcular a força de retenção do ímã do lado direito da estrutura. Para isto baseou-se no método do Tensor de Maxwell [21],[22] e a força ( $F_i$ ) desejada é dada pela equação (3.11):

$$F_i = \frac{\mu_0}{2} (h_2^i)^2 S_2 \quad (3.11)$$

Como é considerada apenas metade da estrutura, a equação (3.11) deve ser multiplicada por dois. Sabendo que  $S_2 = y_1 p_1$  e substituindo (3.10) em (3.11):

$$F_i = 2 \frac{\mu_0}{2} y_1 p_2 \left[ \frac{B_r e_4}{\mu_0} \frac{1}{\left( \frac{y_1 p_1}{x_4 p_2} e_4 + \frac{y_1}{x_4} e_3 + e_2 \right)} \right]^2 \quad (3.12)$$

Como a armadura está colada do lado direito da estrutura, então o termo  $e_2$  é desprezível. Levando isto em consideração e escrevendo a equação (3.12) em termos de  $x_4$  obtém-se:

$$x_4 = \left( \frac{y_1 p_1 e_4}{p_2} + y_1 e_3 \right) \frac{1}{B_r e_4} \sqrt{\frac{F_i \mu_0}{p_2 y_1}} \quad (3.13)$$

Dessa forma para se determinar o comprimento do ímã  $x_4$ , é necessário saber os valores dos seguintes termos:  $B_r$ ,  $\mu_0$ ,  $e_3$ ,  $F_i$ ,  $y_1$ ,  $e_4$ ,  $p_1$  e  $p_2$ .

Os valores de  $B_r$  e  $\mu_0$  são conhecidos, pois  $B_r$  é o valor da indução remanente do ímã e  $\mu_0$  é a permeabilidade do ar. O valor de  $e_3$  é imposto como sendo bem menor que as dimensões do restante do atuador.

Para encontrar os valores de  $F_i$ ,  $y_1$ ,  $e_4$ ,  $p_1$  e  $p_2$  foram impostos alguns fatores de proporcionalidade relacionando valores já conhecidos com as incógnitas que se deseja encontrar.

Sabendo-se a força com que o protótipo construído é capaz de vencer  $F_{ext}$  e observando-se no EFCAD o valor da força de retenção do ímã  $F_i$  para o caso em que a armadura se encontra totalmente à direita da estrutura, escolheu-se um fator de dimensionamento  $\alpha_i$  adequado para relacionar estas duas forças.

Assim sendo calcula-se  $F_i$  como sendo:

$$F_i = \alpha_i F_{ext} \quad (3.14)$$

Com a finalidade de manter uma proporcionalidade entre os atuadores a serem projetados e um atuador já existente no mercado, e também com a preocupação de se evitar uma diminuição do volume de ferro diante dos caminhos percorridos pelos fluxos magnéticos para que não haja saturação no material, foram aplicados outros fatores para relacionar as grandezas restantes para o cálculo de  $x_4$ .

Sendo assim escolheu-se:

$$y_1 = \alpha_1 d_{\max} \quad (3.15)$$

$$p_1 = \alpha_2 y_1 \quad (3.16)$$

$$p_2 = \alpha_3 p_1 \quad (3.17)$$

$$e_4 = \alpha_4 y_1 \quad (3.18)$$

Como as considerações realizadas para se chegar à equação (3.13) não levam em conta o espriamento nem a saturação do material, houve a necessidade de se adicionar um fator  $\alpha_s$  na equação (3.13) a fim de aproximar os valores analíticos dos resultados obtidos pelo EFCAD. Assim sendo:

$$x_4 = \alpha_s \left( \frac{y_1 p_1 e_4}{p_2} + y_1 e_3 \right) \frac{1}{B_r e_4} \sqrt{\frac{F_i \mu_0}{p_2 y_1}} \quad (3.19)$$

Como pode ser observado, todas as dimensões referentes ao ímã já foram encontradas, o próximo passo agora é achar as equações para o dimensionamento da bobina. Para isto deve-se encontrar o equacionamento do circuito magnético para o caso em que a armadura encontra-se colada na extremidade direita do atuador e será considerada apenas a bobina no circuito.

Essa situação pode ser vista na Figura 4.4.

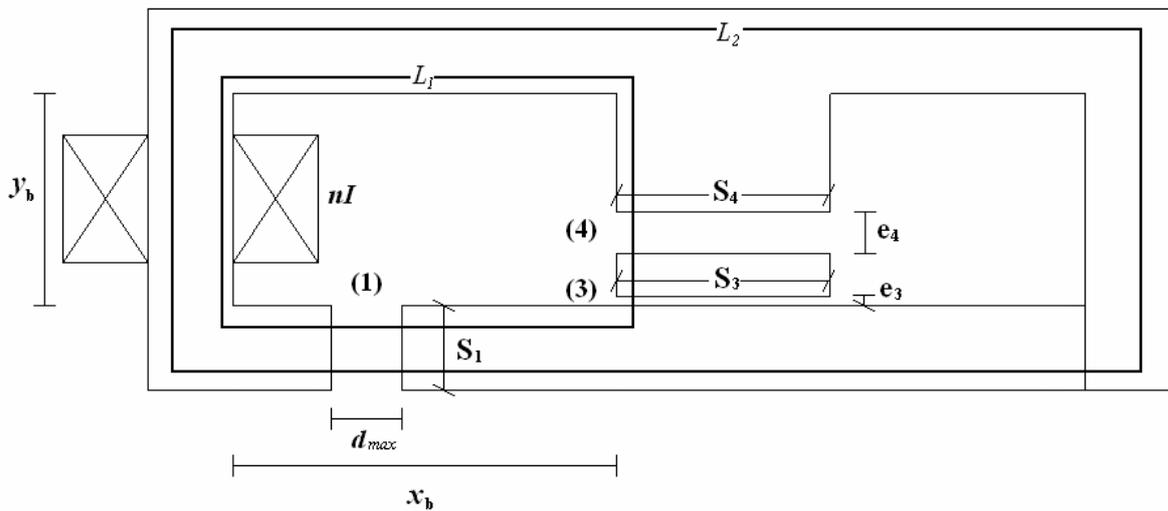


Figura 4.4 Circuito magnético para o dimensionamento da bobina.

Como a relutância do caminho  $L_1$  é muito maior que a do caminho  $L_2$ , pode-se desprezar o fluxo do caminho  $L_1$ . Escrevendo a equação de circulação de campo considerando apenas  $L_2$ :

$$h_1^b d_{max} = nI \quad (3.20)$$

ou

$$nI = h_1^b d_{max} \quad (3.21)$$

Assim, para calcular  $nI$  é necessário ainda encontrar o valor de  $h_1^b$ , pois  $d_{max}$  já é sabido.

Considerando a força produzida pela bobina ( $F_{bob}$ ) como sendo a força solicitada pelo usuário ( $F_{ext}$ ) multiplicada por um fator de proporcionalidade  $\alpha_f$  e dividindo tal força por dois, pois se está considerando apenas metade da estrutura na resolução do circuito magnético tem-se:

$$F_{bob} = \alpha_f \frac{F_{ext}}{2} \quad (3.22)$$

onde

$$F_{bob} = \frac{\mu_0}{2} (h_1^b)^2 S_1 \quad (3.23)$$

E isolando o termo  $h_1^b$ :

$$h_1^b = \sqrt{\frac{2F_{bob}}{\mu_0 S_1}} \quad (3.24)$$

Com o valor de  $h_1^b$  calculado pela equação (3.24) agora se pode achar o valor de  $nI$  pela equação (3.21).

Sendo  $S_b = \frac{nI}{J}$ , onde  $S_b = x_b y_b$  e considerando um valor de densidade de corrente

para os cálculos de projeto de  $J = 6A/mm^2$  pode-se encontrar o valor de  $S_b$ .

Escolhendo-se o valor de mais uma constante de proporcionalidade  $\alpha_b$ :

$$y_b = \alpha_b x_b \quad (3.25)$$

Assim:

$$S_b = \alpha_b x_b^2 \quad (3.26)$$

E  $x_b$  pode ser calculado como:

$$x_b = \sqrt{\frac{S_b}{\alpha_b}} \quad (3.27)$$

Para o cálculo de  $x_2$  (ver Figura 4.2) escolheu-se outro fator de proporcionalidade  $\alpha_5$  e dessa forma se faz:

$$x_2 = \alpha_5 y_1 \quad (3.28)$$

Pela Figura 4.2, percebe-se que  $x_b = x_2 + d_{\max} + x_3$  e os valores de  $x_b$ ,  $d_{\max}$  e  $x_2$  já são conhecidos, pode-se calcular  $x_3$  por:

$$x_3 = x_b - d_{\max} - x_2 \quad (3.29)$$

Para o cálculo de  $y_2$  utiliza-se:

$$y_2 = \alpha_6 e_4 \quad (3.30)$$

E  $y_3$  é calculado da seguinte forma:

$$y_3 = y_b - y_2 - e_4 \quad (3.31)$$

Para o restante das dimensões são escolhidos novos fatores de proporcionalidade e elas são calculadas como:

$$x_5 = \alpha_7 d_{\max} \quad (3.32)$$

$$x_6 = x_1 \quad (3.33)$$

$$p_3 = \alpha_8 p_1 \quad (3.34)$$

$$x_1 = \alpha_9 y_1 \quad (3.35)$$

$$y_4 = \alpha_{10} y_1 \quad (3.36)$$

onde  $p_3$  é a dimensão da profundidade das chapas laterais do atuador e as outras dimensões estão informadas na Figura 4.2.

Considera-se aqui que todas as dimensões do atuador estão devidamente calculadas. As próximas etapas para finalizar os cálculos do Módulo 1 e chegar aos resultados finais referem-se aos cálculos dos parâmetros restantes do atuador e a simulação do comportamento dinâmico do mesmo. Como estas etapas são comuns tanto para o Módulo 1 como para o Módulo 2, elas serão explicadas com mais detalhes no item 4.2 deste capítulo.

#### **4.1.2 Módulo 2**

Como já foi dito anteriormente, neste módulo o usuário insere as dimensões de um atuador e se tem como resultados finais a sua simulação dinâmica. Ou seja, neste módulo não é necessário calcular todas as dimensões que são calculadas no Módulo 1, pois aqui o usuário pode escolhê-las. Entretanto precisa-se calcular a força com que um atuador, de dimensões pré-determinadas pelo usuário, pode vencer.

Como no Módulo 1 foram calculadas algumas dimensões a partir de uma força inserida pelo usuário ( $F_{ext}$ ), basta efetuar o procedimento inverso de cálculos para chegar ao valor de  $F_{ext}$  dadas as dimensões do atuador. Não há necessidade de repetir o procedimento já explicado anteriormente. Assinala-se apenas que a força obtida é aqui um resultado das dimensões da estrutura e não um dado de entrada.

Após o cálculo de  $F_{ext}$  no Módulo 2 do programa tem-se os mesmos elementos determinados tanto no Módulo 1 como no Módulo 2. Dessa forma pode-se avançar com as próximas etapas de cálculos realizadas no item 4.2 deste capítulo para ambos os módulos do programa.

### **4.1.3 Módulo 3**

Após a realização de um projeto pelo usuário quer seja através do Módulo 1 ou do Módulo 2, o programa salva os dados do atuador projetado em um arquivo contendo todas as informações necessárias para que se possa carregar tal arquivo posteriormente e visualizar novamente os resultados obtidos por este atuador.

Uma opção dada para o usuário, através do Módulo 3 do programa, é que ele abra um arquivo de um atuador anteriormente projetado e faça modificações neste projeto. Assim o usuário pode escolher, por exemplo, um novo dimensionamento para a bobina, ou modificar algumas dimensões do atuador, assim como modificar os valores de outros parâmetros envolvidos no projeto.

Dependendo da escolha do usuário o programa refaz alguns dos cálculos já mostrados neste capítulo ou cálculos que ainda serão mostrados posteriormente. Dessa forma não se faz necessário repetir neste item todos os procedimentos de cálculos que podem ser efetuados no Módulo 3 do sistema computacional desenvolvido.

Serão mostradas no item 4.2 as etapas restantes dos cálculos realizados pelo sistema computacional para chegar aos resultados finais.

## **4.2 Simulação Dinâmica**

Com a finalidade de simular o comportamento dinâmico de determinadas grandezas relacionadas com o atuador, se faz necessário obter um modelo do atuador capaz de relacionar alguns parâmetros construtivos com a variação temporal de algumas de suas grandezas.

A modelagem do atuador através de um circuito elétrico equivalente pode ser vista na Figura 4.5, onde  $L$  é a indutância da bobina,  $R$  é a resistência da mesma e  $U$  é a tensão de alimentação.

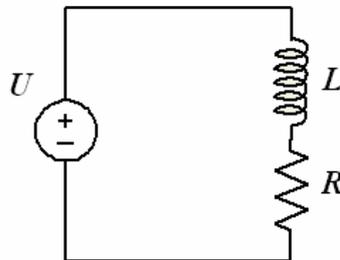


Figura 4.5 Circuito elétrico equivalente do atuador.

Para obter o comportamento dinâmico desejado é necessário resolver um sistema de equações composto pelas duas equações abaixo [8].

$$U = Ri + \frac{d\phi}{dt} \quad (3.37)$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_{mag} - F_c \quad (3.38)$$

onde:  $i = SJ$ ,  $\phi = n\Psi$ ,  $U$  e  $R$  são os mesmos do circuito equivalente da Figura 4.5,  $i$  é a corrente na bobina,  $\phi$  representa o enlace de fluxo total,  $t$  é o tempo,  $m$  é a massa da armadura e  $x$  é o seu deslocamento,  $F_{mag}$  é a força magnética,  $F_c$  é a força total contrária ao movimento,  $S$  é a área da secção transversal do condutor,  $J$  é a densidade média de corrente,  $n$  é o número de espiras da bobina e  $\Psi$  é o fluxo magnético de apenas uma espira.

A equação (3.37) é resultado da análise do circuito elétrico da Figura 4.5, ou seja, a tensão total no terminal da bobina é a soma da tensão devido à resistência do condutor (lei de Ohm) [25] e de outra parcela devido à variação temporal do fluxo magnético na bobina (lei de Faraday) [26].

Já a equação (3.38) é a aplicação da 2ª lei de Newton [27] referente ao princípio fundamental da dinâmica. Pode-se perceber nessa equação que está sendo aplicado o princípio de que a força resultante que age em um corpo é igual ao produto de sua massa pela sua aceleração.

Há diversas maneiras para a resolução das duas equações acima, como pode ser visto em [28], entretanto será descrito aqui apenas o método utilizado no presente trabalho. Para

a resolução das duas equações é necessário escrevê-las de uma maneira mais apropriada. A seguir serão apresentados os passos para que isto seja feito e posteriormente o método numérico utilizado para a resolução das equações.

Utilizando a relação  $\phi = Li$  e introduzindo a velocidade como mais uma incógnita, é possível reescrever a equação (3.37) como segue:

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} v \quad (3.39)$$

onde

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (3.40)$$

De acordo com as equações (3.38), (3.39) e (3.40) o sistema matricial para ser resolvido se torna [29]:

$$\begin{bmatrix} U \\ F_{mag} - F_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & i \frac{dL}{dx} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ x \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{dx}{dt} \\ \frac{dv}{dt} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Para facilitar o entendimento dos próximos passos será denominada cada matriz do sistema (3.41) por uma letra. Assim o sistema será representado pela relação abaixo:

$$[U] = [A][I] + [B][\dot{I}] \quad (3.42)$$

Isolando o termo das derivadas temporais a equação (3.42) se torna:

$$[\dot{I}] = [B]^{-1} \{ [U] - [A][I] \} \quad (3.43)$$

Dessa forma o sistema de equações está devidamente escrito para que se possa resolvê-lo através de algum método numérico como, por exemplo, Método de Euler ou Runge-Kutta [30].

Utilizando-se o método de Runge-Kutta de 4ª ordem, onde  $\Delta t$  é o passo de tempo, as equações (3.44)-(3.48) são resolvidas através de cálculos de passos simples a fim de obter as curvas referentes ao comportamento dinâmico das grandezas corrente, deslocamento e velocidade.

$$[K_1] = \Delta t [B]^{-1} \{ [U] - [A][I] \} \quad (3.44)$$

$$[K_2] = \Delta t [B]^{-1} \left\{ [U] - [A] \left( [I] + \frac{[K_1]}{2} \right) \right\} \quad (3.45)$$

$$[K_3] = \Delta t [B]^{-1} \left\{ [U] - [A] \left( [I] + \frac{[K_2]}{2} \right) \right\} \quad (3.46)$$

$$[K_4] = \Delta t [B]^{-1} \{ [U] - [A] ([I] + [K_3]) \} \quad (3.47)$$

$$[I_{(t+1)}] = [I_t] + \frac{1}{6} \{ [K_1] + 2[K_2] + 2[K_3] + [K_4] \} \quad (3.48)$$

Na equação (3.48)  $[I_{(t+1)}]$  é o passo de cálculo atual e  $[I_t]$  representa o passo anteriormente calculado referente às grandezas corrente, deslocamento e velocidade.

### 4.3 Obtenção dos Parâmetros

Como se pode perceber através da equação (3.41), para calcular os valores das incógnitas desejadas deve-se saber previamente os valores de determinados parâmetros do atuador, ou seja,  $U$ ,  $F_{mag}$ ,  $F_c$ ,  $R$ ,  $\frac{dL}{dx}$ ,  $L$  e  $m$ .

O valor da tensão ( $U$ ) aplicada na bobina é conhecido,  $m$  que é a massa da parte móvel do atuador é calculada através da massa específica do material, ou seja:

$$d = \frac{m}{V} \quad (3.49)$$

onde  $d$  é a massa específica e  $V$  o volume da armadura. O valor de  $R$  é calculado a partir de informações do condutor da bobina pela equação:

$$R = \frac{l}{\sigma S} \quad (3.50)$$

onde  $l$  é o comprimento total do condutor da bobina,  $S$  é a secção transversal do mesmo e  $\sigma$  é a condutividade do material do condutor (cobre). O valor de  $F_c$  contempla as forças contrárias ao movimento da armadura, ou seja, a força da mola ( $F_{mola}$ ), a força de algum aparato que o atuador precisa se opor ( $F_{ext}$ ) e eventuais forças de atrito.

As forças de atrito são desprezadas e  $F_c$  passa a ser calculada então por:

$$F_c = F_{mola} + F_{ext} \quad (3.51)$$

$F_{ext}$  é um valor conhecido, e  $F_{mola}$  é calculado como segue:

$$F_{mola} = kx_{mola} \quad (3.52)$$

Onde  $k$  é a constante elástica da mola e  $x_{mola}$  é a deformação da mola.

Precisa-se ainda obter a força magnética, a indutância e a derivada da indutância em relação ao deslocamento. Tais parâmetros são modificados de acordo com a variação do

fluxo magnético da estrutura. Dessa forma é necessário que se faça uma análise do comportamento magnético da estrutura para a obtenção destes parâmetros.

A metodologia utilizada para a obtenção desses parâmetros foi, primeiramente, adotar o cálculo através do Método de Elementos Finitos e confirmar o funcionamento das equações da simulação com os dados de força e indutância provenientes deste método.

Após essa etapa, era necessário substituir os cálculos efetuados pelo MEF por equações analíticas, pois se deseja facilitar o uso do programa final para que o usuário não precise ter conhecimentos sobre o MEF e nem utilize outro software para o projeto de atuadores.

Assim, para implementar o cálculo das forças e das indutâncias por equações analíticas precisa-se obter todo o equacionamento dos campos magnéticos da estrutura, o que será mostrado posteriormente.

Após a obtenção dos resultados das forças e indutâncias através das equações analíticas obtidas, foram utilizados os cálculos efetuados pelo MEF para calibrar as equações, pois a análise dos campos magnéticos através das equações de circulação de campos e conservação de fluxo não leva em conta a saturação do material nem o espriamento de campos ocorrido na estrutura, enquanto que o MEF leva isso em conta.

#### **4.3.1 Parametrização pelo MEF**

Os dados que ainda precisam ser obtidos para completar as necessidades do cálculo da simulação dinâmica são  $F_{mag}(x,i)$ ,  $L(x,i)$  e  $\frac{dL(x,i)}{dx}$ . Para obter tais parâmetros pelo MEF foi utilizado novamente o programa EFCAD [19].

Para isso foram realizados cálculos discretos de forças e indutâncias variando-se tanto os valores do deslocamento da armadura como da corrente na bobina (densidade de corrente no caso do programa).

As forças foram calculadas como anteriormente, ou seja, calculou-se separadamente cada uma delas nos dois entreferos da armadura e, em seguida, calculou-se a resultante fazendo-se uma subtração dependendo do sentido do deslocamento da armadura.

Para os cálculos das indutâncias retirou-se o ímã do domínio de cálculo e inseriu-se um material com a mesma permeabilidade do ar. Sendo assim o ímã passa a ter o comportamento de um entreferro. A seguir as indutâncias foram calculadas para as mesmas

variações de deslocamento da peça móvel e de corrente utilizados para os cálculos das forças.

Os valores das indutâncias são utilizados para realizar os cálculos de  $\frac{dL(x,i)}{dx}$  fazendo com que seja necessário efetuar uma diferença entre dois valores consecutivos de indutância e dividir pela diferença de dois valores consecutivos de deslocamento, ou seja:

$$\frac{dL(x,i)}{dx} = \frac{\Delta L(x,i)}{\Delta x} \quad (3.53)$$

### 4.3.2 Parametrização através de equações analíticas

Antes de calcular as forças magnéticas nos entreferros e as indutâncias é necessário calcular os campos magnéticos em cada entreferro. São analisados separadamente os campos criados pela bobina e pelo ímã e em seguida soma-se ou subtrai-se suas contribuições para cada entreferro.

Na Figura 4.6 foi considerada apenas a ação da bobina no atuador, ou seja, o ímã é visto como sendo um entreferro.

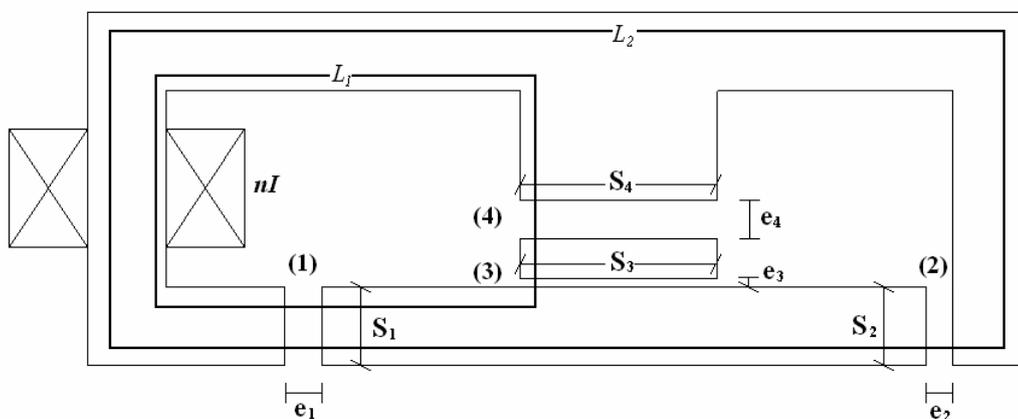


Figura 4.6 Caminhos dos campos magnéticos: apenas a bobina.

Para solucionar o problema é necessário escrever as equações de circulação de campos relativas aos caminhos que envolvem a bobina. Sabe-se que  $S_1 = S_2 = S$  e  $S_3 \neq S_4 \neq S$ . Neste caso tem-se:

- Caminho  $L_1$

$$h_1^b e_1 + h_4^b e_4 + h_3^b e_3 = nI \quad (3.54)$$

- Caminho  $L_2$

$$h_1^b e_1 + h_2^b e_2 = nI \quad (3.55)$$

Escrevem-se agora as equações de conservação de fluxo:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_2 + \phi_3 \\ \mu_0 h_1^b S &= \mu_0 h_2^b S + \mu_0 h_3^b S_3 \end{aligned} \quad (3.56)$$

$$\begin{aligned} \phi_3 &= \phi_4 \\ \mu_0 h_3^b S_3 &= \mu_0 h_4^b S_4 \end{aligned} \quad (3.57)$$

Das equações (3.56) e (3.57) pode-se escrever, respectivamente:

$$h_4^b = h_3^b \frac{S_3}{S_4} \quad (3.58)$$

$$h_2^b = h_1^b - h_3^b \frac{S_3}{S} \quad (3.59)$$

Substituindo (3.58) em (3.54) tem-se:

$$h_1^b e_1 + h_3^b \left( \frac{e_4 S_3}{S_4} + e_3 \right) = nI \quad (3.60)$$

Substituindo (3.59) em (3.55) tem-se:

$$h_1^b e_1 + h_1^b e_2 - h_3^b \frac{e_2 S_3}{S} = nI \quad (3.61)$$

E isolando o termo  $h_3$

$$h_3^b = h_1^b \frac{(e_1 + e_2)S}{e_2 S_3} - \frac{S}{e_2 S_3} nI \quad (3.62)$$

Substituindo (3.62) em (3.60) tem-se:

$$h_1^b e_1 + h_1^b \frac{(e_1 + e_2)S \left( \frac{e_4 S_3}{S_4} + e_3 \right)}{e_2 S_3} - nI \frac{S \left( \frac{e_4 S_3}{S_4} + e_3 \right)}{e_2 S_3} = nI \quad (3.63)$$

Isolando o termo  $h_1^b$

$$h_1^b = \frac{nI \left( e_2 S_3 + \frac{e_4 S_3 S}{S_4} + e_3 S \right)}{e_1 e_2 S_3 + S(e_1 + e_2) \left( \frac{e_4 S_3}{S_4} + e_3 \right)} \quad (3.64)$$

Com a equação (3.64) pode-se calcular  $h_1^b$  a partir dos dados dimensionais do atuador. E com a equação (3.55), devidamente reescrita abaixo, pode-se calcular  $h_2^b$  a partir de  $h_1^b$ :

$$h_2^b = \frac{nI - h_1^b e_1}{e_2} \quad (3.65)$$

A seguir é feito o mesmo estudo realizado acima, porém considerando apenas o ímã na estrutura e eliminando a bobina, conforme se pode ver na Figura 4.7.

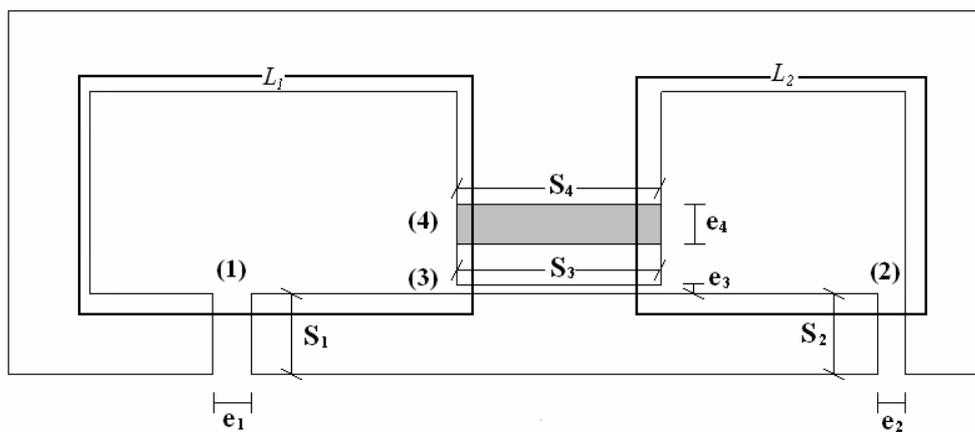


Figura 4.7 Caminhos dos campos magnéticos: apenas o ímã.

As equações de circulação de campos e conservação de fluxo para esta nova situação são apresentadas abaixo:

- Caminho  $L_1$

$$h_1^i e_1 + H_i e_4 + h_3^i e_3 = 0 \quad (3.66)$$

- Caminho  $L_2$

$$h_2^i e_2 + H_i e_4 + h_3^i e_3 = 0 \quad (3.67)$$

$$\phi_3 = \phi_1 + \phi_2 \quad (3.68)$$

$$\mu_0 h_3^i S_3 = \mu_0 h_1^i S_1 + \mu_0 h_2^i S_2$$

$$\phi_i = \phi_3 \quad (3.69)$$

$$B_i S_4 = \mu_0 h_3^i S_3$$

É utilizado ainda a equação referente à curva característica do ímã

$$B_i = \mu_0 H_i + B_r \quad (3.70)$$

Das equações (3.66) e (3.67) pode-se escrever que:

$$h_2^i = h_1^i \frac{e_1}{e_2} \quad (3.71)$$

Substituindo (3.71) em (3.68) e isolando o termo  $h_3^i$  tem-se:

$$h_3^i = h_1^i \frac{S}{S_3} + h_1^i \frac{e_1 S}{e_2 S_3} \quad (3.72)$$

Utilizando-se as equações (3.69) e (3.70) pode-se escrever

$$\mu_0 H_i + \frac{B_r}{\mu_0} = h_3^i \frac{\mu_0 S_3}{S_4} \quad (3.73)$$

E isolando o termo  $H_i$  fica:

$$H_i = h_3^i \frac{S_3}{S_4} - \frac{B_r}{\mu_0} \quad (3.74)$$

Substituindo (3.72) em (3.74) tem-se:

$$H_i = h_1^i \frac{S}{S_4} + h_1^i \frac{e_1 S}{e_2 S_4} - \frac{B_r}{\mu_0} \quad (3.75)$$

Para encontrar a equação referente à  $h_1^i$  deve-se substituir (3.72) e (3.75) em (3.66):

$$h_1^i e_1 + h_1^i \frac{e_4 S}{S_4} + h_1^i \frac{e_1 e_4 S}{e_2 S_4} - \frac{B_r e_4}{\mu_0} + h_1^i \frac{e_3 S}{S_3} + h_1^i \frac{e_1 e_3 S}{e_2 S_3} = 0 \quad (3.76)$$

Que se pode escrever como:

$$h_1^i \left( \frac{e_1 e_2 S_3 S_4 + e_2 e_4 S_3 S + e_1 e_4 S_3 S + e_2 e_3 S_4 S + e_1 e_3 S_4 S}{e_2 S_3 S_4} \right) = \frac{B_r e_4}{\mu_0} \quad (3.77)$$

E finalmente:

$$h_1^i = \frac{B_r e_2 e_4 S_3 S_4}{\mu_0 (e_1 e_2 S_3 S_4 + e_2 e_4 S_3 S + e_1 e_4 S_3 S + e_2 e_3 S_4 S + e_1 e_3 S_4 S)} \quad (3.78)$$

Com o valor de  $h_1^i$  determinado, pode-se calcular  $h_2^i$  através da equação (3.71).

Têm-se agora as equações referentes aos campos  $h_1^b$ ,  $h_2^b$  da bobina e  $h_1^i$ ,  $h_2^i$  do ímã.

Em seguida devem-se observar os sentidos dos campos na estrutura e somar ou subtrair as contribuições de cada campo nos entreferros dependendo do sentido da corrente na bobina. Dessa forma será obtido o campo total em cada entreferro como sendo:

$$h_1 = h_1^b \pm h_1^i \quad (3.79)$$

$$h_2 = h_2^b \pm h_2^i \quad (3.80)$$

Como os campos aqui calculados levam em consideração apenas metade da estrutura devem-se multiplicar os valores encontrados por dois. O próximo passo é calcular as forças magnéticas e as indutâncias.

As forças magnéticas são calculadas baseando-se no método do Tensor de Maxwell [21],[22] através da seguinte equação:

$$F_j = \frac{\mu_0}{2} h_j^2 S \quad (3.81)$$

Onde  $j$  representa os índices 1 ou 2 relacionados ao número do entreferro em que se deseja calcular a força.

Após calcular separadamente as forças em cada entreferro, obtêm-se as forças resultantes da mesma maneira realizada anteriormente, ou seja, para o movimento da direita para a esquerda a força resultante será  $R_e = F_1 - F_2$  e para o movimento oposto  $R_d = F_2 - F_1$ .

Para o cálculo das indutâncias desconsidera-se a presença do ímã na estrutura e utiliza-se apenas o campo magnético que atravessa a bobina, ou seja,  $h_1^b$ .

Dessa forma as indutâncias são calculadas como:

$$L = \frac{n\phi_1}{i} \quad (3.82)$$

Que se pode reescrever como sendo:

$$L = \frac{n\mu_0 h_1^b S_1}{i} \quad (3.83)$$

Com as equações de forças e indutâncias estabelecidas, faz-se o mesmo procedimento já realizado anteriormente, ou seja, calcula-se forças e indutâncias (mas agora com as fórmulas analíticas) para alguns valores discretos de deslocamento da armadura e de corrente. E os valores intermediários aos valores calculados são interpolados linearmente.

Para calcular o último parâmetro desejado  $\frac{dL(x,i)}{dx}$ , utilizam-se os valores de  $L(x,i)$  calculados e acham-se os valores da derivada fazendo  $\frac{dL(x,i)}{dx} = \frac{\Delta L(x,i)}{\Delta x}$ .

#### 4.4 Resultados Obtidos

Foi desenvolvido computacionalmente um programa para a resolução das equações de simulação dinâmica [31] do atuador através do Método de Runge-Kutta de 4ª ordem [30] já mencionado anteriormente. Além dessas equações o programa também calcula os valores dos parâmetros do atuador através das equações analíticas mostradas anteriormente.

Tais parâmetros são as variáveis de entrada do programa que fornece como resultado as variações temporais das seguintes grandezas: corrente, deslocamento e velocidade. Com uma dessas curvas pode-se obter o tempo necessário para o atuador efetuar todo o deslocamento, característica de grande importância para o projetista do atuador.

Dessa forma os resultados aqui mostrados foram obtidos simulando os parâmetros reais do protótipo construído, ou seja, inseriu-se como entrada do programa alguns parâmetros conhecidos como  $U$ ,  $F_c$ ,  $R$ ,  $m$  e calcularam-se os outros

$\left( F_{mag}(x,i), L(x,i) \text{ e } \frac{dL(x,i)}{dx} \right)$  através das equações analíticas já vistas.

A Figura 4.8 mostra um exemplo de resultado obtido pelo programa de simulação dinâmica. Nesta figura pode-se ver o comportamento da corrente, velocidade e deslocamento para a simulação de uma força contrária ao movimento da armadura de 64 N e uma tensão de 90 V na bobina. O tempo total que a peça móvel utilizou para finalizar o seu deslocamento foi de 51 ms.

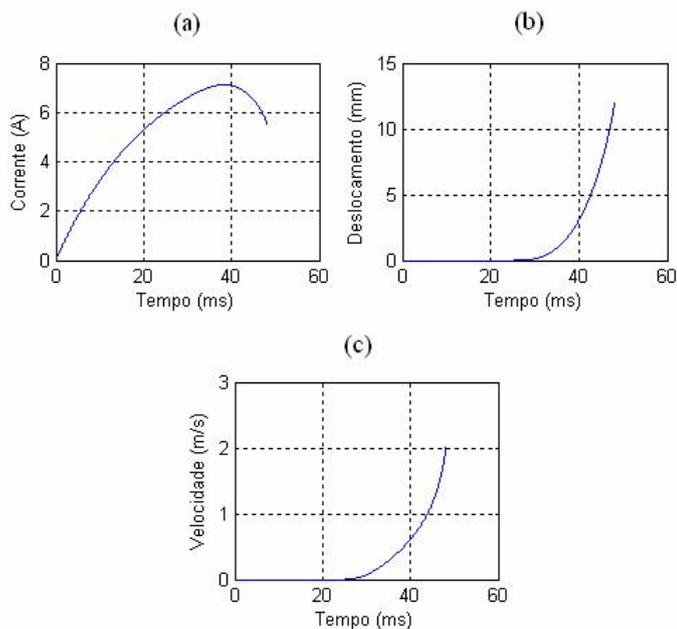


Figura 4.8 Simulação Dinâmica: (a) Corrente, (b) Deslocamento, (c) Velocidade.

#### 4.4.1 Calibração do Programa de Simulação Dinâmica

Como o programa de simulação não leva em conta alguns fenômenos físicos presentes na prática, é de se esperar que haja uma discrepância entre os dados do programa e os experimentais. De fato, em nenhum momento foram consideradas as correntes induzidas que se estabelecem devido à intensa variação de fluxo na estrutura a qual não apresenta laminação, ou forças de atrito presentes no eixo da peça móvel ou mesmo alguma imperfeição na montagem do atuador que possa prejudicar o estabelecimento dos fluxos da bobina e do ímã.

Tendo isso em mente se faz necessário adicionar alguns fatores de correção nas grandezas influenciadas por tais fenômenos físicos para que os dados da simulação se aproximem ainda mais dos dados experimentais.

Tais fatores foram inseridos após comparação das curvas obtidas em laboratório com os resultados do programa de simulação. Para isto foram simulados no programa diversos modos de funcionamento do atuador variando-se tanto a tensão aplicada na bobina como a força a qual a armadura deve se opor.

O resultado dessa comparação após a devida calibração do programa é apresentado no item 4.4.2.

#### 4.4.2 Comparação entre as Curvas Experimentais e Simuladas

As curvas obtidas experimentalmente pela bancada montada no laboratório levam em conta apenas o comportamento dinâmico da corrente na bobina. Já as curvas obtidas pelo programa de simulação levam em consideração tanto a corrente da bobina como o deslocamento e a velocidade da armadura. Nesse item são comparados os dados de corrente obtidos pelo programa e os resultados experimentais.

Apesar de não ser possível a comparação entre as curvas de deslocamento e de velocidade do programa com dados reais dessas grandezas, pode-se assumir que tais dados serão validados indiretamente pela comparação das curvas de corrente, pois tanto a velocidade como o deslocamento dependem indiretamente da corrente aplicada na bobina.

Dessa forma foram realizadas diversas simulações pelo programa considerando os mesmos pontos de operação dos dados experimentais, ou seja, foram introduzidas as dimensões do protótipo no programa, bem como os mesmos valores de tensão e força utilizados experimentalmente.

As figuras a seguir fazem uma comparação de alguns desses modos de funcionamento. Na Figura 4.9, simulou-se o comportamento do atuador para três valores distintos de tensão mantendo sempre a mesma força contrária à armadura (0 N). Já na Figura 4.10, manteve-se o mesmo valor de tensão aplicada na bobina (90 V) e variou-se a carga imposta na armadura.

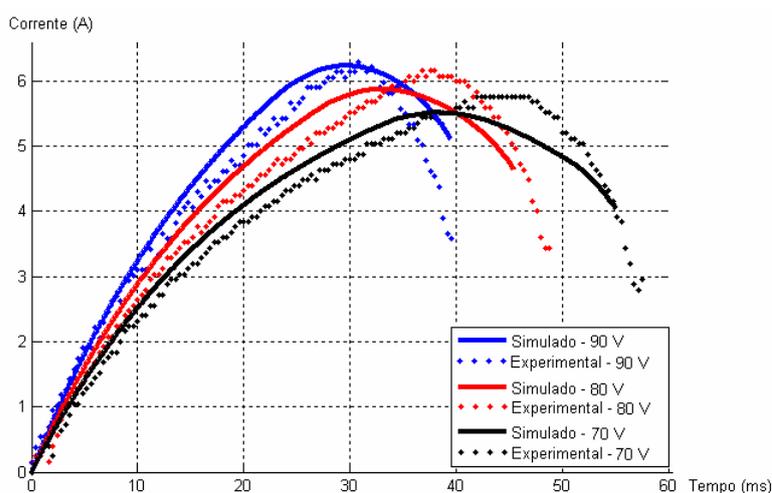


Figura 4.9 Comparação dos resultados variando-se a tensão e com uma carga fixa de 0 N.

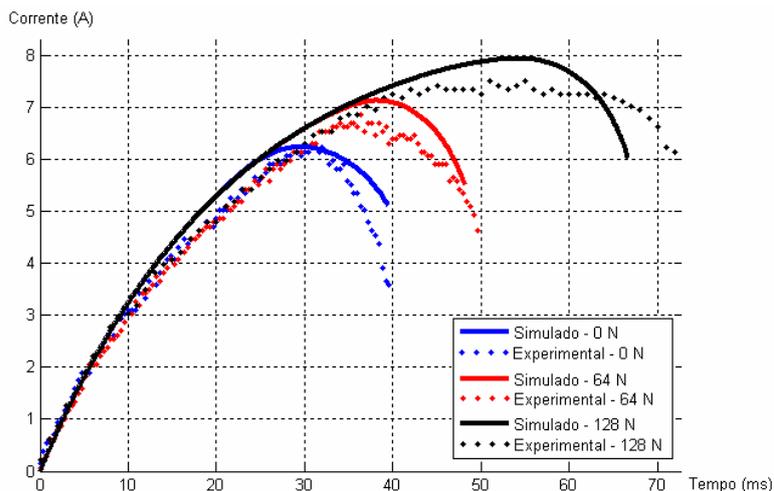


Figura 4.10 Comparação dos resultados variando-se a carga e mantendo a tensão fixa em 90 V.

Cabe ressaltar que foi efetuada uma análise mais completa, com outros modos de operação do atuador, variando-se a tensão da bobina de 50V a 90V e a carga de 0N a 192N.

Pode-se concluir, após comparar os dados de simulação e experimentais, que o programa está reproduzindo de maneira satisfatória o comportamento dinâmico do atuador. Desta maneira, um engenheiro que venha a utilizar esses resultados para o projeto de atuadores estará de posse de dados de um atuador que, ao ser construído, irá se comportar de maneira muito semelhante ao esperado.

## Capítulo 5

# CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Podem-se encontrar muitos estudos e trabalhos sendo realizados, e principalmente já concluídos, quando se leva em consideração assuntos clássicos como motores elétricos ou transformadores. Entretanto, devido ao surgimento relativamente recente dos atuadores magnéticos, percebe-se que poucos estudos foram concretizados até então levando em consideração tais dispositivos.

Inicialmente realizou-se uma pesquisa para saber os tipos de atuadores que há no mercado e as suas características mais importantes na aplicação que se desejava trabalhar, ou seja, em disjuntores com extinção de arco a vácuo.

Devido aos poucos trabalhos realizados em atuadores magnéticos mono-bobina houve a necessidade de estudar primeiramente o princípio de funcionamento destes dispositivos, para posteriormente atingir o objetivo principal que é o desenvolvimento computacional de um programa de projeto.

Para estudar o princípio de funcionamento de tais dispositivos tinha-se um atuador real e um *software* de cálculos de campos magnéticos denominado EFCAD.

Após o estudo teórico, tanto do princípio de funcionamento desses atuadores como de suas características eletromagnéticas, foi construído no laboratório um pequeno protótipo com a finalidade de identificar os aspectos construtivos relevantes de tais dispositivos, bem como para validar posteriormente os estudos teóricos através de dados experimentais obtidos pelo protótipo.

A próxima etapa realizada neste trabalho foi desenvolver um sistema computacional capaz de projetar atuadores de diferentes dimensões e de simular o comportamento dinâmico dos mesmos.

Para o desenvolvimento desse sistema computacional foram utilizadas equações analíticas obtidas a partir da resolução dos circuitos magnéticos dos atuadores e os resultados dessas equações foram calibrados através de uma comparação com os dados obtidos através do *software* EFCAD, pois o MEF leva em consideração os espalhamentos do campo magnético bem como a saturação do material ferromagnético.

Após a concretização do sistema computacional, os dados finais provenientes da simulação dinâmica de um atuador com as dimensões do protótipo construído foram comparados com dados experimentais provenientes do próprio protótipo.

Como o protótipo não apresenta laminação existem correntes induzidas que interferem no desempenho da estrutura. A fim de que os resultados finais da simulação dinâmica contemplem este fato, foram adicionados alguns fatores de correção nos parâmetros eletromagnéticos influenciados pelas correntes induzidas aproximando, dessa forma, ainda mais os resultados teóricos e experimentais.

Cabe ressaltar que a comparação entre dados experimentais e os resultados do sistema computacional foi realizada apenas para o protótipo construído em laboratório, entretanto sabe-se da necessidade de se fazer tal análise para outros protótipos que tenham dimensões diferentes daquelas presentes no protótipo em questão e isto deverá ser realizado como um trabalho posterior à esta dissertação.

Tendo em vista todos os aspectos do trabalho aqui apresentado pode-se concluir que este foi de grande valia tanto para o enriquecimento do conhecimento teórico e prático, como pela divulgação do aprendizado aqui adquirido para a comunidade acadêmica e para outros pesquisadores que se interessarem pelo assunto.

Um aspecto importante do trabalho foi o fato dele agregar tanto conhecimentos teóricos como práticos. Dentre os principais conhecimentos teóricos utilizados está o fato de se realizar uma abordagem através de fórmulas analíticas em conjunto com uma análise da estrutura baseando-se em cálculos pelo método de elementos finitos através do EFCAD.

Os cálculos pelo MEF foram realizados com uma modelagem magnetostática para cada posição da peça móvel. Como trabalho futuro, sugere-se a modelagem magnetodinâmica em três dimensões levando em conta o movimento da peça móvel. Tal abordagem permitirá considerar as correntes induzidas no dispositivo. Além disso, para esta estrutura as profundidades das peças são diferentes e isto pode acarretar em um espraio de fluxo considerável nas extremidades do atuador, justificando a análise tridimensional.

Como as equações analíticas apresentadas neste trabalho não levam em consideração os espraio dos campos magnéticos da estrutura, nem a saturação do material ferromagnético e nem as correntes induzidas que surgem devido à variação brusca de fluxo na estrutura não laminada. Um desafio para a continuidade do estudo de atuadores seria a obtenção de um modelo que leve em consideração essas três características mencionadas.

## Capítulo 6

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JANOCHA, H. (Editor) *Actuators: basics and applications*. New York: Springer-Verlag, 2004.
- [2] SCHMITZ, B. *Magnetic disk drive incorporating a magnetic actuator lock and a very small form factor*. US Patent 5034837, 1991.
- [3] MODY, H. K. *Axial Magnetic Actuator*. US Patent 4905031, 1990.
- [4] BRAUER, J. R. and LUMKES Jr., J. H. Coupled model of a magnetic actuator controlling a hydraulic cylinder and load. *IEEE Transaction on Magnetics*, vol 38, p. 917-920, Mar. 2002.
- [5] MARBOT, P. H. and HANNAFORD, B. *Mini direct drive robot arm for biomedical application*. In: 5<sup>th</sup> International Conference on Advanced Robotics: Robots in Unstructured Environments (Jun. 1991 : Pisa) Proceedings of ICAR 91 Pisa, 1991. p. 859-864.
- [6] DROYLSDEN, S. E. L. and BURY, M. S. *Electromagnetic Actuators*. World Patent WO 99/33078, 1999.
- [7] BRAUER, J. B. *Magnetic Actuators and Sensors*. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2006.
- [8] XIN, L. HUIJUN, G. ZHIYUAN, C. *Magnetic Field Calculation and Dynamic Behavior Analyses of the Permanent Magnetic Actuator*. In: IEE 19<sup>th</sup> INT. SYMP. ON DISCHARGES AND ELECTRICAL INSULATION IN VACUUM (Sep. 2000 : Xi'an) *Proceedings Xi'na*, 2000. p. 532-535.
- [9] DULLNI, E., FINK, H. and REUBER, C. *A vacuum circuit-breaker with permanent magnetic actuator and electronic control*. In: 15<sup>th</sup> Conference on Electricity Distribution (1999 : Nice) Proceedings CIRED Nice, 1999. p. 150-156.

- [10] MCKEAN, B.A.R. and REUBER, C. *Magnets & Vacuum – The perfect match*. In: 5<sup>th</sup> International Conference on Trends in Distribution Switchgear: 400V-145kV for Utilities and Private Networks (Nov. 1998 : London) Proceedings London, 1998. p. 73-79.
- [11] CHALY, A. M., CHERVINSKIY, O. I. and POLUYANOV, V. N. *New generation of vacuum circuit breakers with monostable magnetic actuator*. In: 18<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution (Jun. 2005 : Turin) Proceedings CIRED, Turin 2005.
- [12] MCKEAN, B. and KENWORTHY, D. *Method of manufacturing a bistable magnetic actuator*. World Patent WO 95/07542, 1994.
- [13] REUBER, C., GRITTI, P., TELLARINI, M. and HEIMBACH, M. *eVM1 medium-voltage circuit breaker combines interruption, measuring and protection capability*. In: ABB Review technical journal (Mar. 2004), <http://www.abb.com>, 2007.
- [14] DULLNI, E., FINK, H., HEIMBACH, M. and REUBER, C. *A Family of vacuum circuit-breakers with worldwide applications using common components*. In: 16<sup>th</sup> Conference and Exhibition on Electricity Distribution (Jun. 2001 : Amsterdam) Proceedings CIRED, Amsterdam 2001. p. 22-27.
- [15] TROUT, S. R. and WOOTEN, G. D., Selection and Specification of Permanent Magnet Materials. In: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Sept. 2003 : Indianapolis) *Proceedings*. Indianapolis, 1994. p. 20-23.
- [16] <http://www.magnetosgerais.com.br>, 2007. Magnetos Gerais – Ímãs e Equipamentos Magnéticos.
- [17] AGUILLAR, A. K., BASTOS, J. P. A. e SADOWSKI, N. *Introdução ao Estudo de um Atuador Linear Biestável Mono-Bobina*. In: 7<sup>o</sup> CBMag CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO (Ago 2006 : Belo Horizonte). Anais. Belo Horizonte , 2006.

- [18] IDA, N. and BASTOS, J. P. A. *Electromagnetics and Calculation of Fields*. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1997.
- [19] EFCAD.exe Electromagnetic Fields Computer Aided Design, Software, GRUCAD – UFSC, <http://www.grucad.ufsc.br>, 2007.
- [20] SRAIRI, K., FÉLIACHI M. and REN, Z. Electromagnetic Actuator Behavior Analysis Using Finite Element and Parametrization Methods. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol 31, nº 6, p. 3497-3499, Nov. 1995.
- [21] BASTOS, J. P. A. *Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática*. 1. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.
- [22] BASTOS, J. P. A. and SADOWSKI, N. *Electromagnetic Modeling by Finite Elements*. 1. ed. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [23] BATISTELA, N. J. *Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço ao Silício* Florianópolis, 2001. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [24] LabView.exe, Versão 5.01. Programa para banco de ensaios com instrumentos virtuais. National Instruments Corporation, 1998.
- [25] NILSSON, J. W. e RIEDEL, S. A. *Circuitos Elétricos* 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1999.
- [26] SADIKU, M. N. O. *Elementos de Eletromagnetismo*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- [27] HALLIDAY, D. e RESNICK, R. *Fundamentos de Física*. vol 1 Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1996.
- [28] REN, Z. and RAZEK, A. *Modeling of dynamical behaviors of electro-magneto-mechanical coupled systems*. In: IEEE 2<sup>nd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATION IN ELECTROMAGNETIC (384. : Apr. 1994 : Nottingham). *Proceedings*. Nottingham, 1994. p. 20-23.

- [29] AGUILLAR, A. K., BASTOS, J. P. A., SADOWSKI, N. and BATISTELA, N. J. *Development of a Computational System for Actuators Design*. Artigo aceito para 16<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE COMPUTATION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS – COMPUMAG 2007 (Jun 2007 : Aachen).
- [30] CLÁUDIO, D. M. e MARINS, J. M. *Cálculo Numérico Computacional: teoria e prática*. São Paulo: Atlas, 1989.
- [31] AGUILLAR, A. K., BASTOS, J. P. A., SADOWSKI, N. and BATISTELA, N. J. *Dynamic Behavior of a Mono-coil Linear Actuator*. In: PROGRESS IN ELECTROMAGNETICS RESEARCH SYMPOSIUM – PIERS 2007 (Mar 2007 : Beijing). vol 1, p. 772-774, Mar. 2007.