

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
Tese DEFENDIDA POR Rogério Mendonça
Furtado..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 28.10.2008

Katia Lucchesi Cavalca
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Desenvolvimento de um Atuador Magnético para Excitação sem Contato de Sistemas Rotativos

Autor: Rogério Mendonça Furtado
Orientador: Profa. Dra. Katia Lucchesi Cavalca
Co-orientado: Prof. Dr. Ing. Rainer Nordmann

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

Desenvolvimento de um Atuador Magnético para Excitação sem Contato de Sistemas Rotativos

Autor: Rogério Mendonça Furtado
Orientador: Katia Lucchesi Cavalca
Co-orientador: Prof. Dr. Ing. Rainer Nordmann

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2008
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

F979d Furtado, Rogério Mendonça
Desenvolvimento de um atuador magnético para
excitação sem contato de sistemas rotativos / Rogério
Mendonça Furtado.--Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientadores: Katia Lucchesi Cavalca, Rainer
Nordmann
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Análise modal. 2. Rotores – Dinâmica. 3.
Dispositivos magnéticos. I. Cavalca, Katia Lucchesi. II.
Nordmann, Rainer. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Título em Inglês: A magnetic actuator development for contactless excitation in
rotor systems

Palavras-chave em Inglês: Contactless excitation, Magnetic actuators, Modal
analysis, Rotating machinery

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Paulo Eigi Miyagi, Luiz de Paula do Nascimento, Hans Ingo
Weber, Luiz Otavio Saraiva Ferreira

Data da defesa: 28/07/2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

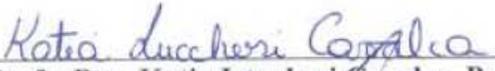
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

TESE DE DOUTORADO

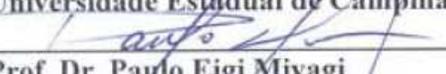
**Desenvolvimento de um Atuador Magnético
para Excitação sem Contato de Sistemas
Rotativos**

Autor: Rogério Mendonça Furtado
Orientador: Profa. Dra. Katia Lucchesi Cavalca
Co-orientador: Prof. Dr. Ing. Rainer Nordmann

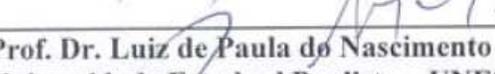
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



Profa. Dra. Katia Lucchesi Cavalca, Presidente
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/FEM



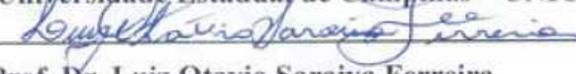
Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi
Universidade de São Paulo – USP/POLI



Prof. Dr. Luiz de Paula do Nascimento
Universidade Estadual Paulista – UNESP/FEIS



Prof. Dr. Hans Ingo Weber
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/FEM



Prof. Dr. Luiz Otavio Saraiva Ferreira
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/FEM

Campinas, 28 de Julho de 2008

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha esposa Flávia Luz de Souza, pelo apoio e companheirismo ao longo desses anos, e ao meu filho Rafael Souza Furtado, uma grande benção de Deus.

Agradecimentos especiais

Gostaria de agradecer, em especial, a minha Mãe, Janete Maria de Novais, que com seus conselhos e ensinamentos me conduziu com grande maestria ao longo dessa jornada chamada vida, e sempre foi minha fonte de inspiração.

À minha irmã, Renata Mendonça Furtado, muito mais do que uma irmã, uma amiga.

Ao meu Pai Rui Osvaldo Mendonça Furtado, pelo apoio nessa caminhada.

Agradecimentos

A Deus pelo dom da vida.

A Professora Katia Lucchesi Cavalca, que acreditou em meu potencial e que sempre forneceu apoio e excelentes condições de trabalho para que pudéssemos desenvolver esta pesquisa.

Ao Professor Rainer Nordmann, que nos recebeu na Alemanha abrindo as portas de seu laboratório e dando total suporte no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Professores Franco Guiuseppe Dedini, Robson Pederiva, Luiz Otavio Saraiva Ferreira e Juan Camino pelas preciosas sugestões e conselhos no desenvolvimento do trabalho.

Aos Funcionários Ferreira, Mauro, Maurício e Renato pelo suporte técnico.

Aos amigos de laboratório Hélio Fiori de Castro, Gregory Daniel Bregion, Rafael Bittencout, Eudardo de Paiva Okabe, Denise Ramalho, Marcelo Braz de Aquino, Irineu Gandara, Zilda Silveira, Ricardo Ugliara Mendes e Felipe do Nascimento pela ajuda durante a pesquisa e pelos momentos compartilhados.

Aos amigos Norman Butzek e Martin Enerst, pelo grande apoio e suporte durante a estadia na Alemanha e desenvolvimento da pesquisa.

Ao CNPq pela ajuda financeira prestada a este trabalho, à CAPES pela bolsa de estudo no exterior e à FAPESP pelo apoio financeiro na aquisição de equipamentos para o laboratório.

“Tudo vale a pena se a alma não é pequena”

Fernando Pessoa

Resumo

FURTADO, Rogério Mendonça, *Desenvolvimento de um Atuador Magnético para Excitação sem Contato de Sistemas Rotativos*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008.113p. Tese (Doutorado)

Um atuador magnético como fonte de excitação em sistemas rotativos é desenvolvido para emprego na análise modal e em outros estudos, envolvendo a excitação sem contato. Embora os sistemas magnéticos para aplicação de forças em máquinas rotativas sejam empregados com alto desempenho (como por exemplo os mancais magnéticos), o desenvolvimento de um sistema simples, para aplicações laboratoriais, se apresenta como uma contribuição experimental útil, para ser empregado numa bancada de testes utilizada no desenvolvimento de projetos de máquinas rotativas. O conceito apresentado é simples, mas permite a excitação externa sem contatos ou mesmo o controle das amplitudes de vibração, quando associado a um sistema de controle. Contudo, a calibração e o estudo do desempenho dinâmico do sistema não são análises simples. Neste sentido, o trabalho apresenta uma experiência prática e discussões sobre o desenvolvimento do atuador magnético utilizado para testes em máquinas rotativas. A influência da corrente elétrica, entreferro, superfície do pólo do atuador e também da frequência de excitação, são apresentadas. A força magnética é estimada, baseando-se na medida da densidade de fluxo magnético, medida por sensores hall.

Palavras Chave

- Excitação sem contato, atuadores magnéticos, análise modal, máquinas rotativas.

Abstract

FURTADO, Rogério Mendonça, *A Magnetic Actuator Development for Contactless Excitation in Rotor Systems*, Campinas, : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 113p. Tese (Doutorado)

A magnetic actuator as excitation source in rotating systems is developed, in order to accomplish modal analysis and other studies involving contactless excitation. Although the use of magnetic systems to apply forces onto rotating machinery has been carried out with high performance level (for example, magnetic bearings), the development of a conveniently easy and simple device for laboratory application presents interesting contribution to experimental methods used in test rigs based on similarity design to rotating machinery. The initial concept of the magnetic actuator proposed here is simple, but enables either the external excitation without contact or the vibration control when associated with a controller system. However, the performance characteristics tuning to attend the dynamic demand of the system is not so trivial. Following this focus, the work brings practical experience and discussion about the development and performance analysis of a magnetic actuator used for rotating machinery tests. The influence of the electrical current in the actuator coils, the air-gap between actuator and rotative system, the type of surface of the actuator poles (flat or curved) as well as excitation frequency was verified. Force estimation was based on the magnetic flux density, measured by hall sensors.

KeyWords

- Contactless excitation, magnetic actuators, modal analysis, rotating machinery.

Sumário

Lista de Figuras	xii
Nomenclatura	xvii
Capítulo 1	1
Introdução	1
Motivação	1
Levitação Magnética	3
Capítulo 2	8
Contexto em que o projeto está inserido	8
Capítulo 3	10
Revisão bibliográfica	10
Capítulo 4	17
Conceitos Básicos de Magnetismo	17
Campo magnético e linhas de campo	17
Campo magnético em um fio retilíneo longo	19
Cálculo do Campo Magnético.....	19
Solenóide.....	20
Relutância, Permeância e Fluxo Magnético.....	22
Ferromagnetismo	23
Saturação.....	25
Histerese.....	26
Cálculo da Força Magnética	28
O Efeito Hall	32
Montagem Diferencial (Linearização)	33

Capítulo 5	37
Modelo teórico do atuador	37
Modelo da bobina	37
Parâmetros da bobina.....	42
Modelo do amplificador.....	44
Modelo do sistema mecânico.....	45
Modelo global do atuador magnético	50
Modelo do suporte mecânico do atuador magnético	54
Distribuição das bobinas no atuador magnético	56
Influência do perfil do pólo no cálculo da força magnética	58
Capítulo 6	64
Resultados Experimentais	64
Confecção da Bobina	64
Sensor de efeito Hall.....	66
Controlador	68
Programa de geração e aquisição de dados.....	70
Bancada experimental.....	71
Resultados experimentais	77
Capítulo 7	106
Discussão, conclusão e sugestão para trabalhos futuros	106
Discussão e conclusão	106
Sugestão para trabalhos futuros	109
Referências Bibliográficas	110

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Turbina do Boeing 777 acidentado em Heathrow, Londres.	2
Figura 1.2 – Bucha de deslizamento utilizada para conectar o <i>shaker</i> ao eixo (a), Mesquita 2004, mesmo sistema de conexão, porém empregando-se um rolamento (b), Okabe 2007.	3
Figuras 1.3 – Componentes básicos empregados na levitação magnética ativa.	5
Figura 1.4 – Densidade de fluxo e força de atração magnética.....	6
Figura 3.1 – Diagrama de blocos de um sistema mecatrônico.....	13
Figura 4.1 – Linhas de campo magnético de um ímã.....	18
Figura 4.2 – Linhas de campo magnético para uma corrente i percorrendo um fio retilíneo longo. O símbolo \times indica que a corrente está dirigida para dentro da página.	19
Figura 4.3 - Lei de Ampère aplicada a uma curva amperiana arbitrária que envolve dois fios retilíneos longos, mas exclui um terceiro fio.	20
Figura 4.4 – Linhas de campo magnético numa seção transversal vertical através do eixo central de um solenóide.....	21
Figura 4.5 – Analogia entre circuito magnético (a) e circuito elétrico (b).....	23
Figura 4.6 – (A) dipolos distribuídos aleatoriamente e (B) dipolos alinhados formando um campo magnético resultante.....	24
Figura 4.7 – Influência do material ferromagnético na obtenção da densidade de fluxo magnético.	25
Figura 4.8 – Curva de saturação de um material ferromagnético.	26
Figura 4.9 – Curva de magnetização de um material ferromagnético e o laço de histerese associado.	28
Figura 4.10 – Exemplo de um sistema eletromecânico.....	29
Figura 4.11 – Circuito magnético do sistema apresentado na Figura 4.10.	29

Figura 4.12 – Área sob a curva de magnetização $B-H$ e volume de ar no entreferro.....	31
Figura 4.13 – Corrente passando por uma placa condutora; (a) sem fluxo magnético; (b) com fluxo magnético cruzando perpendicularmente (de cima para baixo) e (c) com fluxo magnético no sentido de baixo para cima.	33
Figura 4.14 – Montagem diferencial utilizando um par de atuadores magnéticos.	34
Figura 6.1 – Máquina manual para enrolamento de bobinas.	66
Figura 6.2 – (a) Bobina confeccionada sem a utilização da máquina de enrolamento; (b) bobina montada com o emprego da máquina de enrolamento.	66
Figura 6.3 – Dimensões em milímetros do sensor hall.	67
Figura 6.4 – Sensor hall e anel de proteção feito de cobre.....	68
Figura 6.5 – Diagrama do controlador proporcional empregado.	69
Figura 6.7 – Programa de geração e aquisição de dados.....	72
Figura 6.8 – Bancada experimental.	73
Figura 6.9 – Dimensões do rotor analisado.....	73
Figura 6.10 – Mancal hidrodinâmicos e seus componentes.....	74
Figura 6.11 – Dimensões em milímetros da placa utilizada para montar o núcleo do atuador.....	75
Figura 6.12 – (a) Entreferro e perfil de pólo utilizado; (b) posicionamento dos sensores hall.	76
Figura 6.13 – Montagem diferencial do atuador na bancada experimental.	76
Figura 6.14 – Força magnética inserida no rotor parado e forças obtidas nos mancais 1 e 2 para uma excitação senoidal de 30Hz, sem o emprego do controlador.	77
Figura 6.15 – Força magnética inserida no rotor parado e forças obtidas nos mancais 1 e 2 para uma excitação senoidal de 40Hz, sem o emprego do controlador.	78
Figura 6.16 – Fluxo magnético obtido nos sensores hall, para uma excitação senoidal de 30Hz, sem o emprego do controlador.	79
Figura 6.17 – Fluxo magnético obtido nos sensores hall, para uma excitação senoidal de 40Hz, sem o emprego do controlador.	79
Figura 6.18 – Corrente elétrica aplicada nos atuadores 1 (Curr_1) e 2 (Curr_2), para uma excitação senoidal de 30Hz, sem o emprego do controlador.	79
Figura 6.19 – Corrente elétrica aplicada nos atuadores 1 (Curr_1) e 2 (Curr_2), para uma excitação senoidal de 40Hz, sem o emprego do controlador.	80

Figura 6.20 – Força magnética inserida no rotor parado e forças obtidas nos mancais 1 e 2 para uma excitação senoidal de 5Hz, com o emprego do controlador.....	80
Figura 6.21 – Força magnética inserida no rotor parado e forças obtidas nos mancais 1 e 2 para uma excitação senoidal de 15Hz, com o emprego do controlador.....	81
Figura 6.22 – Força magnética inserida no rotor parado e forças obtidas nos mancais 1 e 2 para uma excitação senoidal de 30Hz, com o emprego do controlador.....	81
Figura 6.23 – Força magnética inserida no rotor parado e forças obtidas nos mancais 1 e 2 para uma excitação senoidal de 40Hz, com o emprego do controlador.....	81
Figura 6.24 – Fluxo magnético obtido nos sensores hall, para uma excitação senoidal de 5Hz, com o emprego do controlador.....	82
Figura 6.25 – Fluxo magnético obtido nos sensores hall, para uma excitação senoidal de 15Hz, com o emprego do controlador.....	83
Figura 6.26 – Fluxo magnético obtido nos sensores hall, para uma excitação senoidal de 30Hz, com o emprego do controlador.....	83
Figura 6.27 – Fluxo magnético obtido nos sensores hall, para uma excitação senoidal de 40Hz, com o emprego do controlador.....	83
Figura 6.28 – Corrente elétrica aplicada nos atuadores 1 (Curr_1) e 2 (Curr_2), para uma excitação senoidal de 5Hz, com o emprego do controlador.....	84
Figura 6.29 – Corrente elétrica aplicada nos atuadores 1 (Curr_1) e 2 (Curr_2), para uma excitação senoidal de 15Hz, com o emprego do controlador.....	84
Figura 6.30 – Corrente elétrica aplicada nos atuadores 1 (Curr_1) e 2 (Curr_2), para uma excitação senoidal de 30Hz, com o emprego do controlador.....	85
Figura 6.31 – Corrente elétrica aplicada nos atuadores 1 (Curr_1) e 2 (Curr_2), para uma excitação senoidal de 40Hz, com o emprego do controlador.....	85
Figura 6.32 – Ponto de aplicação da força magnética (F_{mag}) e pontos de medição para obtenção das funções de transferência, mancais 1 e 2 e deslocamento horizontal da massa.	86
Figura 6.33 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e a força no mancal 1 na direção horizontal com o rotor parado, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.	88

Figura 6.34 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e a força no mancal 1 na direção horizontal com o rotor girando a 30 Hz, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	89
Figura 6.35 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e a força no mancal 1 na direção horizontal com o rotor girando a 40 Hz, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	90
Figura 6.36 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e a força no mancal 2 na direção horizontal com o rotor parado, utilizando o atuador magnético. .	91
Figura 6.37 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e a força no mancal 2 na direção horizontal com o rotor operando a 30Hz, utilizando o atuador magnético.	91
Figura 6.38 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e a força no mancal 2 na direção horizontal com o rotor operando a 40Hz, utilizando o atuador magnético.	92
Figura 6.39 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento horizontal da massa com o rotor parado, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.	93
Figura 6.40 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento horizontal da massa com o rotor girando a 30Hz, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	94
Figura 6.41 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento horizontal da massa com o rotor girando a 40Hz, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	95
Figura 6.42 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção X com o rotor parado, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	96
Figura 6.43 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção X com o rotor girando a 30Hz, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	97

Figura 6.44 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção X com o rotor girando a 40Hz, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	97
Figura 6.45 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção Y com o rotor parado, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	98
Figura 6.46 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção Y com o rotor girando a 30Hz, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	99
Figura 6.47 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção Y com o rotor girando a 40Hz, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	100
Figura 6.48 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção X com o rotor parado, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	101
Figura 6.49 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção X com o rotor girando a 30Hz, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	101
Figura 6.50 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção X com o rotor girando a 40Hz, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	102
Figura 6.51 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção Y com o rotor parado, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	103
Figura 6.52 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção Y com o rotor girando a 30Hz, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	104
Figura 6.53 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção Y com o rotor girando a 40Hz, (a) excitação utilizando o <i>shaker</i> , (b) excitação utilizando o atuador magnético.....	104

Nomenclatura

Letras Latinas

<i>A</i>	- Área do pólo do atuador. [m ²]
<i>B</i>	- Densidade de fluxo magnético. [T]
<i>dl</i>	- Segmento diferencial de linha. [m]
<i>dx</i>	- Deslocamento infinitesimal. [m]
<i>E</i>	- Campo elétrico. [V/m]
<i>f</i>	- Frequência. [Hz]
<i>g</i>	- Entreferro. [m]
<i>H</i>	- Campo magnético. [A/m]
<i>i</i>	- Corrente elétrica. [A]
<i>I₁</i>	- Corrente elétrica no atuador 1. [A]
<i>I₂</i>	- Corrente elétrica no atuador 2. [A]
<i>k</i>	- Ganho
<i>l</i>	- Comprimento de um dos lados da curva <i>amperiana</i> [m]
<i>L</i>	- Indutância. [H]
<i>N</i>	- Número de espiras
<i>P</i>	- Permeância magnética. [Wb/A]
<i>Q</i>	- Carga elétrica. [C]
<i>R</i>	- Resistência elétrica. [Ω]
<i>ℜ</i>	- Relutância magnética. [A/Wb]
<i>T</i>	- Constante de tempo. [s]

- W^* - Energia magnética por unidade de volume. [VAs/m³]
 W - Energia magnética. [J]
 W_m - Energia mecânica. [J]

Letras Gregas

- μ - Coeficiente de permeabilidade magnética. [H/m]
 Φ - Fluxo magnético.[Wb]
 σ - Condutividade elétrica. [S/m]
 θ - Ângulo [rad]

Abreviações

MMA - Mancais Magnéticos Ativos

FEM - Força Eletromotriz

FMM - Força Magneto Motriz

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo são apresentados a motivação e o conceito básico de levitação magnética. Embora seja apresentada uma sucinta descrição e aplicação dos mancais magnéticos, o foco do trabalho é o emprego do atuador magnético. Sendo este um sistema mais simples que o mancal magnético, sua aplicação se restringe à geração de forças magnéticas utilizadas no processo de identificação modal (dos parâmetros modais) e diagnóstico de falhas.

Motivação

O constante desenvolvimento e aperfeiçoamento de estruturas e equipamentos têm levado projetistas e engenheiros a construir máquinas que operam em condições cada vez mais extremas de carga e rotação. Esses equipamentos, quando operados nessas condições, ficam sujeitos as forças de natureza dinâmica que, quando não corretamente identificadas e avaliadas, podem levar às falhas no equipamento e até mesmo às catástrofes envolvendo vidas humanas. A Figura 1.1 mostra uma das turbinas do Boeing 777 acidentado em Heathrow em janeiro deste ano.



Figura 1.1 – Turbina do Boeing 777 acidentado em Heathrow, Londres.

Durante sua viagem da China para Inglaterra, a aeronave sobrevoou a Sibéria com temperaturas envolvendo 34 graus Celsius negativos. Desta maneira, a água existente no combustível se congelou causando a parada dos motores pouco antes de sua aterrissagem em Heathrow, G1(2008).

Na tentativa de se evitar catástrofes deste tipo, e até mesmo diminuir as ocorrências dessas falhas, são empregadas inúmeras ferramentas de análises e monitoramento durante o ciclo de operação desses equipamentos. Uma ferramenta amplamente utilizada é a análise modal. Empregando-se esta técnica de análise, é possível estimar parâmetros dinâmicos importantes dos sistemas, tais como: frequência natural, fatores de amortecimento e modos de vibração.

Na análise modal convencional, uma excitação conhecida é aplicada à estrutura e medições de deslocamento, velocidade ou aceleração são utilizadas para estimar esses parâmetros dinâmicos. A aplicação da excitação é feita de diferentes formas, sendo a mais comum delas a utilização de excitadores eletromecânicos (*shakers*) ou martelos de impacto. Para aplicação utilizando-se o *shaker*, é necessário que este equipamento seja acoplado mecanicamente à estrutura em estudo, sendo que, quando se utiliza o martelo de impacto, o contato mecânico também ocorre. Uma vez acoplado o excitador eletromecânico, este é controlado por um gerador capaz de provê-lo com diferentes sinais. O acoplamento entre o excitador e a estrutura, bem como o tipo de sinal gerado, constituem importantes variáveis na qualidade dos resultados obtidos durante o ensaio.

Em dinâmica de rotores, uma lacuna na parte experimental para análise modal de máquinas rotativas é a excitação externa. Caso seja empregado um excitador eletromecânico, a conexão

entre este sistema e o rotor pode ser feita utilizando-se uma bucha de deslizamento ou um rolamento, Figuras 1.2(a) e 1.2(b), respectivamente.

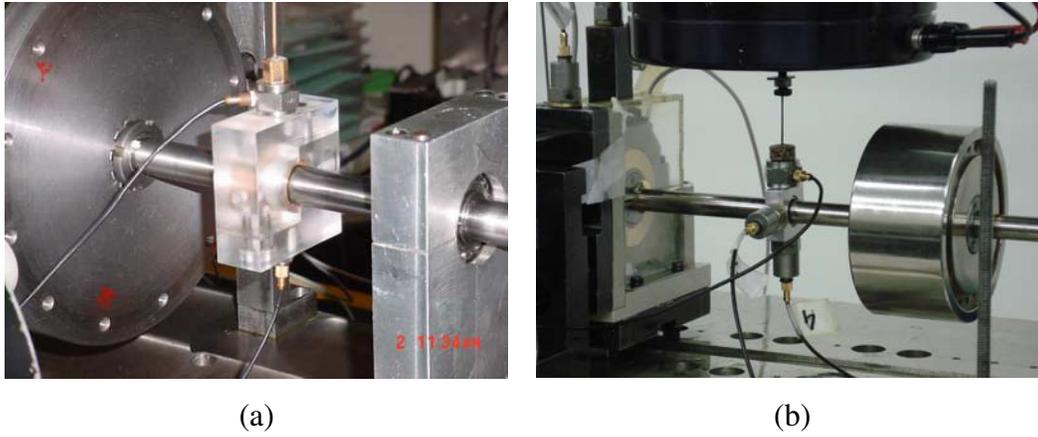


Figura 1.2 – Bucha de deslizamento utilizada para conectar o *shaker* ao eixo (a), Mesquita (2004), mesmo sistema de conexão, porém empregando-se um rolamento (b), Okabe (2007).

Entretanto, este tipo de conexão gera forças tangenciais resultantes do atrito entre a parte em movimento e a parte fixa. Essas forças podem excitar modos não desejados, além de tornar difícil o emprego experimental da técnica, uma vez que as hastes (*stingers*) que ligam o excitador a bucha ou rolamento podem se romper durante a análise.

Uma alternativa que pode se empregada na solução deste problema é a utilização de mancais magnéticos ativos (MMA). Este equipamento tem como principal objetivo à substituição dos mancais convencionais (rolamento, hidrodinâmicos) por um sistema mecatrônico, capaz de suspender o eixo girante, utilizando para isto forças magnéticas.

Levitação Magnética

O uso da força magnética para levantar objetos vem sendo objeto de estudo desde meados de 1800. Entretanto, embora vários experimentos tenham sido realizados com este objetivo, apenas na década de 60 esta aplicação se mostrou viável economicamente. Sendo assim, nas duas últimas décadas, o conhecimento desenvolvido foi capaz de reduzir os custos e a complexidade deste tipo de sistema, possibilitando assim, sua aplicação comercial.

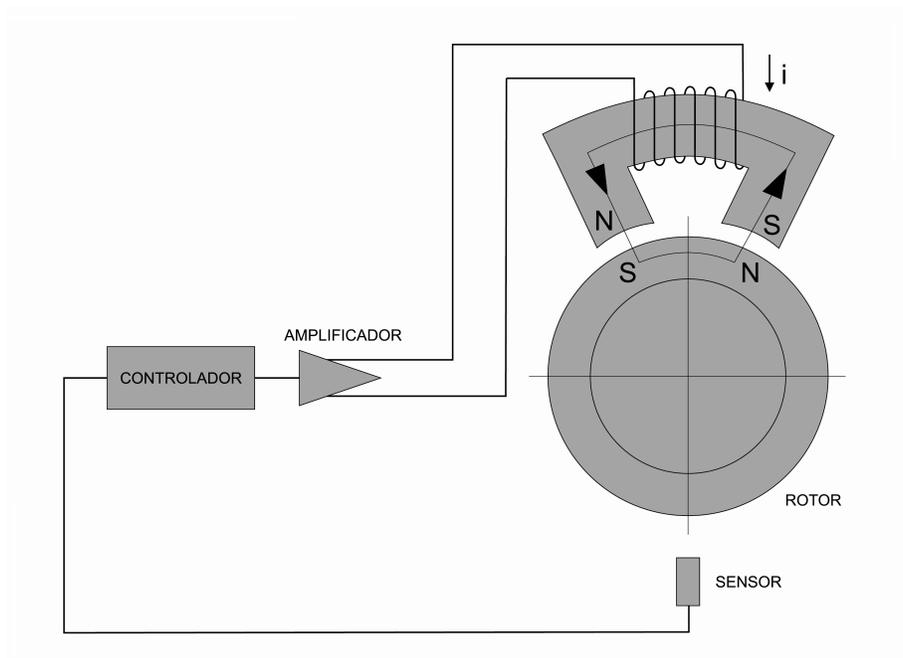
Mancais magnéticos não necessitam de lubrificantes para sua operação. Este fato os torna interessantes para aplicações em temperaturas extremas, operações em meio agressivo e aplicações envolvendo sua utilização no vácuo.

A operação sem atrito entre o mancal e o eixo também é uma importante característica deste tipo de mancal. Isto implica na redução da potência do motor utilizado, resultando assim num aumento do desempenho do sistema. A redução do atrito também possibilita uma diminuição da temperatura de trabalho, quando comparado aos sistemas que utilizam os mancais de rolamento ou mancais hidrodinâmicos. Por trabalhar em temperaturas mais baixas, este sistema apresenta uma baixa frequência de manutenção, quando comparado ao sistema hidrodinâmico. Também são removidos equipamentos auxiliares, diminuindo, assim, os pontos potenciais de falha.

Harris e Widbro (2003), mostram que os mancais magnéticos consomem apenas parte da energia gasta pelos mancais hidrodinâmicos pelo fato de trabalharem sem contato. Em aplicações envolvendo turbo compressores de gás natural, uma economia de aproximadamente 90.000 euros por ano foi possível, para uma máquina com potência acima de 1MW.

Por trabalhar sem contato com o eixo, este tipo de mancal permite elevadas rotações, com velocidades das superfícies atingindo a ordem de 250m/s, podendo, assim, ser aplicado em máquinas de usinagem rápida (Harris e Widbro, 2003).

O Mancal Magnético Ativo é baseado na força de atração gerada por um atuador magnético. Para suspender um corpo magneticamente são necessários basicamente cinco componentes, como mostrado na Figura 1.3. São eles: corpo fabricado de material ferromagnético, atuador magnético, sensor de deslocamento, controlador e amplificador.



Figuras 1.3 – Componentes básicos empregados na levitação magnética ativa.

O controle pode ser feito por algoritmos que variam a corrente i , conseqüentemente, a força aplicada, em função do sinal obtido pelo sensor de deslocamento. Algumas técnicas de controle empregam um dispositivo eletrônico chamado de DSP na sigla em inglês (Digital Signal Processing). Esses sistemas podem realizar cálculos medindo a posição e regulando a corrente com uma frequência (ciclo) de 10.000 vezes por segundo.

Outros sistemas de grande importância são as fontes de potência e os amplificadores. As fontes de potência convertem energia da forma de corrente alternada para a corrente contínua, para posteriormente serem empregadas nos amplificadores. Quanto maior a capacidade dos amplificadores, maiores são as fontes utilizadas. Os amplificadores regulam a corrente no sistema e sua ação depende da ação de comando dada pelo controlador. A escolha do amplificador depende das especificações da máquina.

Embora menos usuais, também existem sistemas de levitação que não empregam um laço de controle para estabilizar sua operação. Um exemplo são os trens japoneses magneticamente levitados, onde a força magnética de suspensão é gerada a partir da interação entre o fluxo de bobinas supercondutoras e a corrente induzida em bobinas. Entretanto, a maioria dos sistemas que empregam a levitação magnética o fazem utilizando a força de atração magnética. Esta força é, inerentemente, uma força instável, fazendo com que o corpo levitado se mova em direção ao

pólo do atuador. Desta maneira, para se estabilizar o posicionamento do rotor, um controle em malha fechada é necessário (Chiba et al., 2006a).

Essa força de atração é diretamente proporcional ao quadrado da densidade de fluxo magnético no entreferro e a área do pólo do atuador. Valores usuais de densidade de fluxo estão na ordem de 1T (Tesla). Desta maneira, é possível obter forças da magnitude de $40\text{N}/\text{cm}^2$ ou cerca de $4\text{kgf}/\text{cm}^2$. Porém, alguns materiais feitos de aço silício apresentam uma densidade de fluxo máxima de 1.7 a 2T. Entretanto, para se obter esses valores de fluxo, uma força magneto motriz extremamente alta é necessária, o que requer uma grande quantidade de espiras e um elevado valor de corrente elétrica aplicada na bobina, levando assim à necessidade do emprego de um sistema de resfriamento externo. Desta maneira, os engenheiros consideram mais prático aumentar a área do pólo do que aumentar a densidade de fluxo magnético, quando se busca aumentar a força gerada pelo atuador (Chiba et al., 2006a).

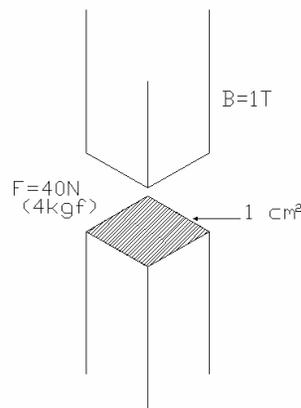


Figura 1.4 – Densidade de fluxo e força de atração magnética.

Além de sua aplicação para suspensão de eixos, o MMA também pode ser utilizado em sistemas de identificação e monitoramento de falhas. Por sua característica de operação sem contato, o mesmo pode ser empregado como elemento de sensor e atuador em máquinas rotativas. Contudo, para identificação e diagnósticos baseados em funções de transferência, é necessário uma medição acurada da força, uma vez que os sensores de deslocamento já atingiram precisão suficiente (Aenis, 2002).

Aenis et al. (2002), apresentam uma comparação entre duas formas de estimativa da força magnética sobre o sistema rotativo. O primeiro método, mais usual, emprega os valores de corrente na bobina e o valor do entreferro para se estimar a força magnética. O segundo, utiliza a

medição direta da densidade de fluxo magnético, por meio de sensores hall, para obtenção desta força. Para o caso utilizando a medição da corrente e do entreferro, foram obtidos erros máximos da ordem de 8% no cálculo da força, comparando-se a força estimada com a força medida por meio de uma célula de carga. Empregando-se os sensores hall, este erro foi reduzido para 2%, para o caso onde foram utilizados 4 sensores hall, um para cada atuador, e de 1% para o caso onde foram utilizados 8 sensores hall, um para cada pólo do atuador.

Bash (2005) também utilizou MMA para detecção de falhas, mas especificamente trincas e contato do eixo com os selos (*rub*). Mas, em seu trabalho, os mancais magnéticos foram utilizados apenas como atuadores magnéticos, uma vez que o rotor estava sendo suportado por mancais convencionais.

Como o objetivo desta pesquisa é investigar o emprego dos atuadores magnéticos como ferramenta de identificação e diagnóstico de falhas, o método empregado para medição da força magnética utiliza os sensores hall para medição da densidade de fluxo magnético. Foram instalados um sensor em cada pólo do atuador, buscando-se, assim, uma medição mais acurada da força.

Capítulo 2

Contexto em que o projeto está inserido

Em janeiro de 2004, o grupo do Laboratório de Máquinas rotativas – LAMAR, localizado na Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, em conjunto com o grupo de Mechatronik im Maschinenbau da Technische Universität Darmstadt – Alemanha, tiveram um projeto de cooperação aprovado (PROBAL – Projeto Brasil-Alemanha, Nº 04/179) financiado pela CAPES/DAAD, cujo título era “aspectos dinâmicos e sensibilidade paramétrica de máquinas rotativas aplicados à transmissão de potência e detecção de falhas”.

O objeto deste projeto era o de trocar experiência entre os dois grupos, além de desenvolver ferramentas de modelagem e diagnóstico de falhas em máquinas rotativas. O grupo brasileiro, coordenado pela professora Katia Lucchesi Cavalca, já vinha desenvolvendo estudos em máquinas rotativas ao longo dos anos, sendo sua especialidade os sistemas rotativos sustentados por mancais hidrodinâmicos. O grupo alemão, coordenado pelo professor Rainer Nordmann, é um grupo de reconhecida experiência internacional na área de dinâmica de rotores, cujo foco são sistemas mecatrônicos, mais precisamente, sistemas sustentados por mancais magnéticos.

Dentro dos diversos trabalhos e ferramentas de pesquisa desenvolvidos em parceria pelos grupos, surgiu a idéia de utilizar forças magnéticas para excitar a bancada de testes existente no LAMAR e, com isso, empregar essas forças em ferramentas de análise e diagnóstico do sistema rotativo. A motivação veio da necessidade de melhoria das funções de transferência obtidas entre a força de excitação e as respostas de deslocamentos e acelerações do rotor. Trabalhos anteriores

já haviam levantado essas funções de transferência, entretanto, empregando métodos convencionais de excitação, tais como excitadores eletromecânicos e martelos de impacto. Como alternativa a este tipo de excitação, projeto e aplicação de um atuador magnético foram propostos, com o objetivo de realizar a excitação sem contato empregando-se para isto, forças magnéticas.

Neste sentido, foi realizado um estudo para o desenvolvimento de um sistema simples e robusto que pudesse ser acoplado a bancada de testes, fornecendo forças de excitação, suficientemente confiáveis, para serem empregadas nas ferramentas de análise. Dentro deste contexto surgiu o presente trabalho.

Este é o primeiro trabalho do grupo brasileiro utilizando a tecnologia de sistemas magnéticos para análise dos sistemas rotativos. Assim, este trabalho também aborda informações básicas do processo de desenvolvimento e construção do atuador magnético. São apresentados os modelos teóricos da bobina, contendo o circuito elétrico, o modelo do circuito magnético e do sistema mecânico. Também são apresentados modelos em elementos finitos desses sistemas, além dos resultados experimentais.

No presente estágio, o atuador desenvolvido é capaz de fornecer forças de excitação magnética em apenas uma direção. Como processo contínuo de estudo e desenvolvimento, o grupo Brasileiro, em conjunto com o mesmo grupo alemão, receberam, recentemente, aprovação de um novo projeto de pesquisa em conjunto. Neste projeto (Projeto FAPESP-DGF, N° 07/54647-4, intitulado “comportamento dinâmico e controle ativo de vibrações em máquinas rotativas sobre mancais hidrodinâmicos”), será desenvolvido um novo atuador, utilizando os mesmos conceitos, porém capaz de fornecer forças magnéticas em ambas direções perpendiculares. Desta maneira, será possível empregar o atuador magnético para controle de vibrações, além da possibilidade de utilizá-lo na análise modal complexa, que necessita de excitações independentes em duas direções.

Capítulo 3

Revisão bibliográfica

O estudo dos dispositivos envolvendo o conceito de mancais magnéticos apresenta uma literatura recente, porém vasta e abrangente.

Em Skowronski (1993), é possível encontrar uma introdução básica aos mancais magnéticos. O trabalho é um relatório apresentado a Agência Espacial Norte Americana (NASA) como parte de pesquisas voltadas a forças magnéticas em aplicações espaciais. O autor apresenta a suspensão magnética, que é a base do conceito dos mancais magnéticos, como provável solução no controle de painéis solares na estação espacial. São apresentadas as equações básicas do eletromagnetismo e as aproximações utilizadas na obtenção da força no atuador magnético. Também são apresentadas, graficamente, a relação entre a força magnética e a quantidade de espiras e corrente, a relação entre a mesma força e a área do pólo do atuador, além da influência da distância do entreferro.

Harris e Widbro (2003), trazem uma abordagem sucinta sobre os mancais magnéticos. São apresentadas informações básicas sobre a suspensão magnética e as características dos mancais magnéticos. O trabalho sinaliza para a aplicação deste tipo de equipamento em máquinas que operam no vácuo, em temperaturas altas e baixas e em processos contendo fluidos corrosivos. Também é apresentada a vantagem de sua operação sem contato, o que diminui as perdas relativas às fricções, existentes nos mancais convencionais. Um exemplo comercial é apresentando, comparando o sistema utilizando os mancais magnéticos com o sistema

empregando mancais hidrodinâmicos. Um compressor a gás é utilizado para demonstrar esta diferença.

O livro do professor Chiba, (Chiba et al., 2006a) apresenta uma abordagem ampla sobre os mancais magnéticos e motores elétricos sem mancais. É apresentada uma introdução sobre o assunto e algumas grandezas de forças magnéticas e aplicações são dadas. No capítulo 2, a obtenção da força magnética para diferentes circuitos magnéticos é apresentada com clareza de detalhes e exemplos de aplicação prática. Também é possível encontrar informações sobre os controladores utilizados e a influência de seus ganhos na resposta do mancal. A dinâmica do sistema mecânico é analisada, gerando dados que podem ser utilizados na estratégia de controle e na escolha do circuito eletrônico.

O cálculo da força magnética utilizando as equações de Maxwell pode ser encontrado em Maslen (2000). Esta é uma obra de referência quando o assunto são os mancais magnéticos. Nela é possível encontrar informações básicas sobre a origem da força magnética, magnetismo, histerese, e outras. A obra apresenta equações para o cálculo do campo, densidade de fluxo e força magnética, em atuadores e mancais magnéticos. O emprego da montagem diferencial (montagem de dois atuadores em lados opostos) e a utilização da corrente de indução na linearização da força magnética, são apresentados passo a passo. Informações importantes sobre o projeto do mancal e os amplificadores empregados podem ser encontradas. O autor apresenta também alguns sensores de deslocamento normalmente utilizados e suas principais características. Informações sobre tipos de controladores e estratégias de controle também são abordadas.

Algumas importantes limitações físicas a respeito dos mancais magnéticos são apresentadas em Schweitzer (2002). Os pontos estudados são: capacidade de carga, tamanho, rigidez, temperatura, precisão, velocidade, perdas e dinâmica. A capacidade de carga do mancal depende de diversos fatores, dentre eles, são importantes o arranjo e a geometria do atuador, as propriedades magnéticas do material utilizado no núcleo do atuador, os sistemas elétricos e eletrônicos, e as leis de controle. Em mancais radiais, considerando-se um fluxo magnético usual de aproximadamente 1,5 Tesla, é possível se obter forças da ordem de 32 N/cm^2 . Em alguns materiais especiais a base de ligas de cobalto, é possível se obter um fluxo magnético da ordem de 1,9 Tesla, o que elevaria a força magnética a patamares da ordem de 60 N/cm^2 . Sobre a rigidez do mancal, uma maneira de obtê-la é por meio de um controlador PID. A parte integral do

controlador é responsável por retornar o rotor para sua posição original antes da aplicação da carga. A constante de tempo, também não pode ser arbitrariamente pequena sem aumentar a constante de rigidez P e a constante de amortecimento D . A faixa de frequência do mancal também é abordada no trabalho, e sua relação é diretamente proporcional a potência do amplificador e inversamente proporcional a força magnética e valor do entreferro. As dimensões e a velocidade são, em geral, parâmetros limitados pelas aplicações e não por condições físicas.

Schweitzer (2005), apresenta os aspectos de “confiabilidade e segurança” aplicados aos mancais magnéticos. O autor mostra as várias aplicações deste tipo de mancal, que vão desde pequenas bombas moleculares até grandes compressores trabalhando na faixa de megawatts. Segundo ele, pelo fato dos mancais magnéticos serem sistemas mecatrônicos, estão sujeitos a falhas específicas nos sub-sistemas que os compõem, tais como o sistema de software, os circuitos eletrônicos e a falha mecânica. Mesmo sendo teoricamente impossível criar um sistema totalmente seguro, o autor destaca alguns pontos que devem ser analisados durante o projeto de sistemas desse porte. Um exemplo, é a utilização da norma ISO para vibrações em sistemas rotativos empregando mancais magnéticos (ISO 14839), a aplicação de sistemas de redundância, a utilização de mancais de segurança e, finalmente, o emprego do FMECA (Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis) com o auxílio de diferentes profissionais das áreas de projeto, produção, testes, além de usuários. O autor finaliza o trabalho com o conceito de máquinas inteligentes. Neste tipo de sistema, a máquina conhece seu estado atual e é capaz de otimizá-lo por meio de informações internas processadas. Isto conduz a um melhor funcionamento, com características de auto-calibração, auto-diagnóstico, auto-correção, e ainda, associado a isso, menor manutenção e maior segurança. Dentro deste conceito de máquina inteligente, é apresentado um diagrama de blocos contendo os principais pontos, e uma bancada de teste, onde a técnica foi empregada.

O emprego dos mancais magnéticos para identificação de falhas é um dos pontos abordados por Aenis et al. (2002). Neste trabalho, os autores ressaltam os aspectos de atuador e sensoriamento que podem ser obtidos por meio dos mancais magnéticos e alertam para a estimação correta da força magnética uma vez que, para o desenvolvimento de ferramentas para diagnóstico de falhas, este é um parâmetro importante. São apresentadas diferentes maneiras de se estimar a força magnética, comparando-a com o valor real. Os resultados mostram que, utilizando a medição da corrente e do entreferro, o erro máximo obtido na estimação da força foi

de 8%. Utilizando-se os sensores de efeito hall, este erro caiu para 2%, quando são empregados um sensor por atuador, e de 1%, quando são utilizados um sensor em cada pólo, ou seja, dois sensores por atuador. Sendo a ferramenta de diagnóstico de falha empregada, baseada na medição das funções de resposta em frequência (FRF), o correto valor da estimativa da força magnética se torna um fator importante no emprego desta técnica. Utilizando o modelo de elementos finitos para o rotor, e o ajuste do modelo da estrutura mecânica utilizando técnicas de análise modal experimental, o diagnóstico foi realizado sobre uma bomba de água, cujo eixo é suportado por mancais magnéticos.

Kasarda et al. (2007), mostram que a obtenção da força magnética, utilizando o valor da corrente elétrica e da distância do entreferro, pode ser melhor estimada empregando-se o método de medição multiponto. Os resultados mostram que empregando-se esta técnica, é possível obter valores de força com previsões de 1.03% da força real, com um desvio padrão de 0.83%. Este é um resultado significativo quando comparado com a técnica usual, que emprega apenas um ponto de medição, pois, para esta técnica, o valor da previsão da força é de 5.76% da força real, com um desvio padrão de 6.17%.

Em Nordmann (2005), os mancais magnéticos também são utilizados na identificação, diagnóstico e otimização do processo, entretanto, o trabalho tem um enfoque voltado ao sistema mecatrônico. Segundo o autor, no sistema mecatrônico, os sinais são medidos por meio de sensores e processados em microcontroladores. Forças e/ou momentos são gerados pelos atuadores e agem sobre o processo, controlados pelas funções dos microcontroladores. A Figura 3.1 mostra um diagrama de blocos, exemplificando a idéia do autor.

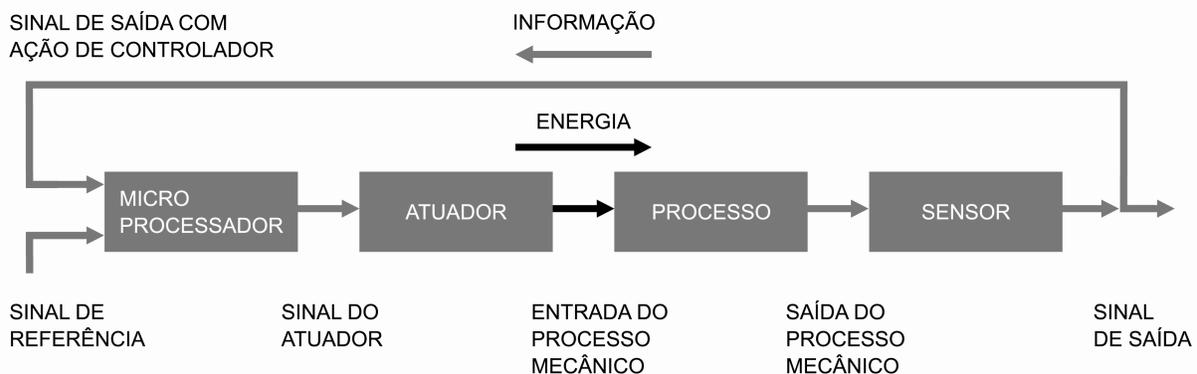


Figura 3.1 – Diagrama de blocos de um sistema mecatrônico.

Imãs permanentes foram utilizados por Araújo e Lépure (1993), no controle de vibração em rotores. Os autores modelaram as forças magnéticas utilizando equações analíticas, o modelo do rotor-mancal foi desenvolvido utilizando o método da matriz de transferência, e a resposta do sistema foi obtida utilizando a análise modal. A excitação externa foi gerada por meio de imãs permanentes com entreferro inicial de 3mm, amplitude máxima de 1mm e frequência do movimento senoidal de 400 rad/s. A força de controle também foi gerada empregando-se um imã permanente, com controle inicial do entreferro de 3mm, na frequência de movimento senoidal de 480 rad/s e amplitude de 1mm. Testes experimentais foram realizados em um rotor com velocidade de 1000 rpm. O disco central teve sua amplitude de deslocamento reduzida quando o controle foi aplicado.

Chiba et al. (2006b) empregam forças magnéticas para diminuição da vibração em eixos. Forças radiais são utilizadas para controlar as amplitudes de vibração durante a passagem da primeira velocidade crítica do rotor.

A detecção de falhas em sistemas rotativos utilizando mancais magnéticos também é objeto de estudo de Silva (Silva, 2006). Em seu trabalho, o autor baseia-se no emprego das equações de correlações, através da formulação matricial de Ljapunov, para sistemas lineares estacionários, juntamente com redes neurais artificiais para realizar o diagnóstico. Para a aplicação do método, foram desenvolvidos dois modelos matemáticos, baseados no método dos elementos finitos (FEM) para o rotor. Os processos de detecção das falhas mecânicas apresentaram resultados satisfatórios, o autor conseguiu distinguir a localização das falhas dentro do sistema.

Bash (2005), utiliza mancais magnéticos como atuadores para monitorar as condições de operação de uma bancada de testes suportada por mancais convencionais. As falhas analisadas foram trincas no rotor e a fricção (*rub*). O autor aponta para trabalhos onde o mesmo tipo de falha já foi estudado, porém para máquinas suportadas por mancais magnéticos. O objetivo do trabalho é identificar essas falhas, utilizando o mancal apenas como elemento de excitação, e não de suporte. O estudo foi realizado empregando-se um mancal heteropolar com oito pólos. A fricção foi realizada empregando-se 2 parafusos deslocados em 90° em direções radiais e as trincas foram obtidas realizando-se um corte com 0.635mm de largura com profundidades de 10, 25 e 40% do valor do diâmetro do eixo, que é de 15.9mm. Os resultados mostram que, quando o contato ocorre sem a rotação do eixo, os valores das frequências naturais aumentam, enquanto as amplitudes da resposta diminuem, com o aumento da força de contato. Medidas dinâmicas

também foram realizadas, onde foram detectadas as alternâncias entre contatos mais leves e mais severos. Com a presença da trinca, foi observado que o primeiro e o segundo modo foram pouco afetados. Já a frequência natural correspondente ao terceiro modo diminuiu com o aumento da profundidade da trinca.

As perdas de energia nos mancais magnéticos também são objeto de estudo de Allaire (1997), e seus resultados são apresentados em um relatório à NASA. Estudando essas perdas, e minimizando-as, é possível prolongar a vida útil dos mancais, uma vez que podem operar em temperaturas mais baixas e, ao mesmo tempo, poupar energia. Este é um fator importante em sistemas como turbinas a gás, veículos espaciais, motores elétricos e bombas em corações artificiais. O autor utiliza uma bancada de testes inserida numa câmara para simular o vácuo, sendo o sistema composto por um rotor suspenso por dois mancais magnéticos e dois motores de indução. A bancada foi projetada para medir as perdas nos mancais por meio de medição acurada da conversão da energia cinética do rotor em energia térmica. São feitos estudos utilizando duas configurações de mancais magnéticos: heteropolar e homopolar. Estudos realizados, empregando-se os mancais heteropolares, mostram que, quanto maior é o valor da distância do entreferro, menores são as perdas geradas. As perdas devido à histerese se mantêm, praticamente as mesmas, independentemente do entreferro. Já as perdas relacionadas às correntes parasitas (*eddy current*) são fortemente dependentes do entreferro: quanto menor este, maiores são essas perdas. Esse comportamento também foi verificado no modelo em elementos finitos desenvolvido pelo autor. Quando se realiza a comparação entre as perdas da configuração heteropolar e homopolar, observa-se que esta última apresenta menor perda. Esses resultados são apresentados graficamente durante a parada da máquina.

Uma análise sobre os diversos sensores que podem ser aplicados na levitação magnética é encontrada em Boehm et al. (1993). Neste trabalho, os autores apresentam características referentes à mudança de fase entre o sinal de entrada e o sinal de saída do sensor, resposta em frequência, estabilidade, interferência, resolução e efeitos da temperatura nesses sensores. São apresentados os sensores de corrente parasita (*eddy current*), sensores capacitivos, sensores de efeito hall, sensores ópticos, sensores a laser e sensores ultra-sônicos.

Antila (1998) utilizou um modelo em elementos finitos bidimensional não linear, para determinar os parâmetros linearizados de um mancal magnético radial. O método foi verificado utilizando-se duas máquinas de testes. Os resultados apontam a possibilidade de se empregar o

mancal operando em sua região de saturação. O efeito do acoplamento entre os movimentos em duas direções perpendiculares (X e Y) também é estudado. A saturação nos amplificadores é estudada, baseada em modelos não lineares e descrevendo funções de aproximação. Também são apresentados modelos para o estudo de correntes parasitas e da histerese magnética. O modelo de corrente parasita é derivado da solução do campo magnético em uma única direção. O modelo é um modelo linear o qual foi linearizado em torno do ponto de operação do mancal radial.

Nicolisky et al. (2000) apresenta trabalho envolvendo mancais magnéticos e mancais de encosto com tecnologia supercondutora.

Dentro deste contexto, este trabalho visa contribuir no desenvolvimento e aplicação de um atuador magnético simples, para atuar como fonte de excitação externa sem contato, quando da aplicação de técnicas de análise modal de máquinas rotativas, o que implica em características particulares destes dispositivos, devido à necessidade de compensar forças opostas de atração, assim como o efeito da vibração do rotor em movimento rotativo, dentro da folga do atuador, ou ainda, do entreferro.

Capítulo 4

Conceitos Básicos de Magnetismo

Neste capítulo será apresentada ao leitor uma introdução básica sobre eletromagnetismo, além de alguns conceitos que serão amplamente empregados ao longo do trabalho, tais como: campo magnético, linhas de campo, densidade de fluxo magnético, força magnética, entreferro, saturação, etc.

Campo magnético e linhas de campo

Sabe-se que o campo elétrico \vec{E} é gerado por cargas elétricas Q e que a magnitude deste campo é diretamente proporcional à quantidade de cargas de mesmo sinal, Halliday et al. (2007). Embora existam teorias sobre a existência de cargas magnéticas (*monopolos magnéticos*), até hoje não existe notícia sobre a observação experimental deste tipo de carga. Sendo assim, as teorias sobre magnetismo apontam para duas formas de se produzir o campo magnético: pelo movimento de cargas eletricamente carregadas e pela existência de campo magnético *intrínseco* em partículas elementares.

No primeiro caso, o campo magnético surge com a movimentação de cargas elétricas, como no caso de uma corrente passando por um fio, sendo este tipo de dispositivo comumente chamado de solenóide, ou ainda, a base de construção de um eletroímã.

No segundo caso, as partículas elementares, como os elétrons, possuem seu campo magnético *intrínseco*, que é resultante do movimento de rotação dos elétrons sobre seu próprio eixo: cargas elétricas em movimento. Este tipo de campo é uma propriedade básica de muitas partículas elementares, tais como as propriedades de massa e carga elétrica (quando existem). Em alguns materiais, este tipo de partícula se rearranja com as partículas vizinhas para formar um campo magnético mais intenso. Este é o princípio da existência dos ímãs permanentes. Em outros materiais esses campos se anulam, o que gera materiais com campo magnético nulo.

O campo magnético pode ser representado por meio de linhas de campo, onde a direção tangente da linha em qualquer ponto dá a direção do campo naquele ponto, e o espaçamento entre essas linhas é uma medida do módulo do campo. Assim, linhas que estiverem mais próximas representam um campo magnético mais forte com relação às que estiverem mais espaçadas.

A Figura 4.1 mostra as linhas de campo magnético de um ímã permanente. Note que essas linhas atravessam o ímã formando superfícies fechadas. Observando esta mesma figura, é possível notar que os efeitos magnéticos são mais intensos próximos às extremidades do ímã.

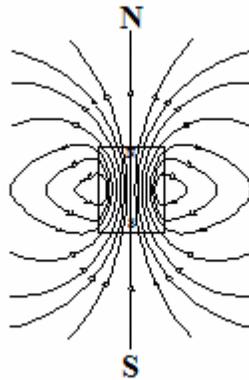


Figura 4.1 – Linhas de campo magnético de um ímã.

A extremidade pela qual as linhas emergem é chamada de pólo norte, sendo a oposta chamada de pólo sul. Experimentalmente, é possível notar que pólos magnéticos opostos se atraem e pólos semelhantes se repelem, ou seja, o pólo norte é atraído somente pelo pólo sul e vice-versa (Halliday et al., 2007).

Campo magnético em um fio retilíneo longo

Como dito anteriormente uma carga elétrica em movimento cria um campo magnético. Para um fio retilíneo longo, percorrido por uma corrente elétrica, um campo magnético é criado ao seu redor e a direção de campo é dada pela regra da mão direita (Halliday et al., 2007).

A Figura 4.2 apresenta as linhas de campo magnético para o caso de uma corrente percorrendo um fio retilíneo longo, cuja direção está perpendicular ao plano da folha dirigida para dentro.

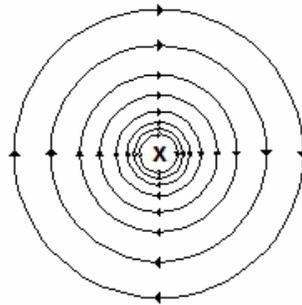


Figura 4.2 – Linhas de campo magnético para uma corrente i percorrendo um fio retilíneo longo.

O símbolo \times indica que a corrente está dirigida para dentro da página.

Cálculo do Campo Magnético

Uma maneira de correlacionar uma distribuição de corrente e o campo magnético por esta gerado, é por meio da lei de Ampère. Inicialmente desenvolvida por André Marie Ampère (1775-1836) essa lei nos permite resolver problemas de campo magnéticos com altos graus de simetria com simplicidade e elegância, Equação 4.1.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i \quad \rightarrow \quad \oint H \cos(\theta) dl = \sum i \quad (4.1)$$

O símbolo presente na integral indica que a lei é aplicada a uma curva fechada chamada de *curva amperiana*. O campo magnético é dado por H , dl indica o segmento diferencial de linha, i é a corrente líquida englobada pela curva e θ o ângulo entre os vetores \vec{H} e $d\vec{l}$. A Figura 4.3 apresenta um exemplo de como aplicar esta lei para uma curva amperiana arbitrária, onde os fios

transportam as correntes i_1 , i_2 , e i_3 nos sentidos indicados (o símbolo \otimes indica que a corrente está dirigida para dentro do plano, o símbolo \odot indica que a corrente está dirigida para fora do plano).

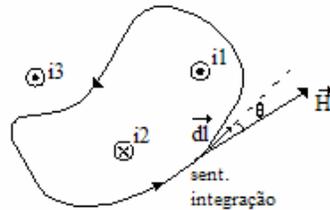


Figura 4.3 - Lei de Ampère aplicada a uma curva amperiana arbitrária que envolve dois fios retilíneos longos, mas exclui um terceiro fio.

Para se determinar o valor de i , somamos algebricamente as correntes que atravessam a curva amperiana.

Entretanto, a Equação 4.1 apresenta o cálculo do campo magnético H e não da densidade de fluxo magnético B propriamente dita. Porém, sabe-se que o campo magnético H cria uma densidade de fluxo magnético B onde quer que este exista. Essas grandezas são relacionadas por um fator característico do meio, chamado coeficiente de permeabilidade μ . Para o ar, o valor do coeficiente de permeabilidade é $4\pi \times 10^{-7}$ (henry/metro). No SI (Sistema Internacional de Unidades) a unidade da densidade de fluxo magnético é Tesla cujo símbolo é (T).

$$B = \mu H \quad (4.2)$$

Solenóide

Para o caso onde a corrente não mais atravessa um fio longo, mas sim em uma bobina helicoidal, pode-se utilizar a lei de Ampère para calcular o campo magnético em seu interior. Um solenóide *ideal* é definido como uma bobina helicoidal onde seu comprimento é bem superior que seu diâmetro. A Figura 4.4 mostra a região central de um solenóide, onde o campo magnético é a soma vetorial dos campos criados por cada uma das espiras que enlaça a bobina (Halliday, 2007).

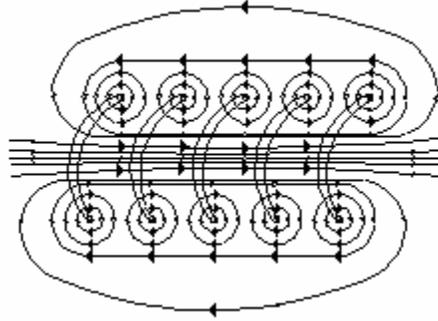


Figura 4.4 – Linhas de campo magnético numa seção transversal vertical através do eixo central de um solenóide.

Observando a figura acima, nota-se que, para pontos próximos aos fios, o comportamento magnético se assemelha ao caso de um fio retilíneo longo. A mesma figura também sugere que os campos tendem a se cancelar entre espiras adjacentes e que, na região central, essas linhas de campo são aproximadamente paralelas.

Considerando o caso de um solenóide ideal, pode-se dizer que o campo magnético fora do solenóide é nulo, aplicando, assim, a lei de Ampère para uma curva amperiana quadrada de lado l , que engloba a região superior e interna da bobina, tem-se:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i \quad \rightarrow \quad Hl = Ni \quad (4.3)$$

sendo N o número de espiras contidas nesta curva amperiana e i a corrente que percorre uma das espiras. Deve-se ressaltar que, durante a integração ao longo da curva, a região externa do solenóide apresenta $H = 0$ e que o produto $H \cos(\theta)l$, para $\theta = 0$ e 90° é nulo. O produto Ni também é conhecido como *força magneto motriz* e sua unidade é o ampère-volta.

Utilizando as equações 4.2 e 4.3, pode-se obter o valor da densidade de fluxo magnético produzido por um solenóide.

$$B = \mu \frac{Ni}{l} \quad (4.4)$$

sendo l o comprimento do solenóide, que representa um dos lados da *curva amperiana*.

Relutância, Permeância e Fluxo Magnético

O campo magnético obtido por um solenóide foi definido pela Equação 4.4. Multiplicando-se a densidade de fluxo magnético pela área da seção transversal que o campo atravessa, obtém-se o fluxo magnético. O fluxo magnético ϕ é definido pela Equação 4.5, e sua unidade no SI é weber:

$$\phi = \int B dA \quad (4.5)$$

Considerando-se uma densidade média de fluxo magnético B que atravessa perpendicularmente uma área de seção transversal A , pode-se dizer que:

$$\phi = BA \quad (4.6)$$

Assim das Equações 4.6 e 4.4, tem-se:

$$\phi = \mu \frac{Ni}{l} A = \frac{Ni}{l / \mu A} = \frac{Ni}{\mathfrak{R}} = \frac{F}{\mathfrak{R}} \quad (4.7)$$

sendo

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{1}{P} \quad (4.8)$$

Como dito anteriormente, F é a força magneto motriz. Já \mathfrak{R} é a *relutância* magnética e P é chamado de *permeância* magnética (Sen, 1997).

O circuito apresentado na Figura 4.5(a) representa o circuito magnético equivalente de um solenóide. Uma analogia entre circuito elétrico e o circuito magnético é mostrada na Figura 4.5 (b).

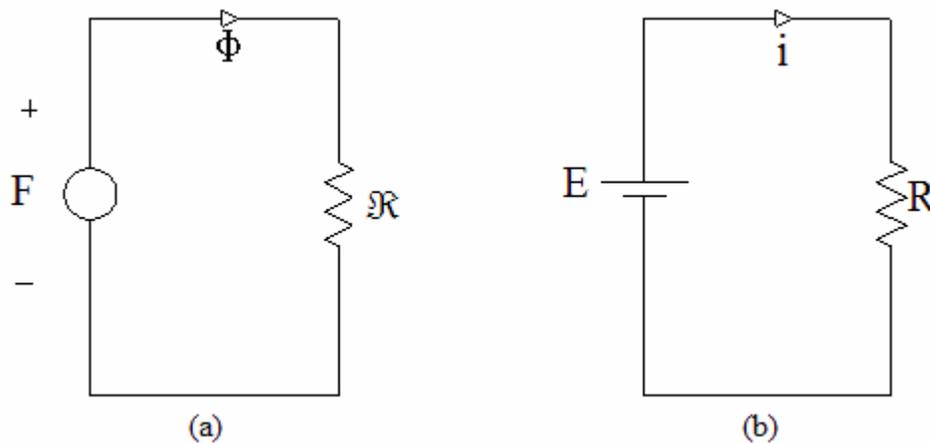


Figura 4.5 – Analogia entre circuito magnético (a) e circuito elétrico (b).

A Tabela 4.1 apresenta os termos utilizados nos dois circuitos (magnético e elétrico) e sua equivalência. Fem significa Força eletromotriz e Fmm Força magneto motriz

Tabela 4.1 – Parâmetros empregados no circuito magnético e elétrico.

Ação	Circuito Elétrico	Circuito Magnético
Força motora	Fem (E)	Fmm (F)
Produz	Corrente ($i=E/R$)	Fluxo ($\Phi=F/R$)
Limitado por	Resistência ($R=l_r/\sigma A$)	Relutância ($R=l_r/\mu A$)

sendo σ condutividade elétrica, μ coeficiente de permeabilidade magnética e l_r o comprimento do circuito.

Ferromagnetismo

Sendo a relutância, no circuito magnético, o equivalente à resistência no circuito elétrico, uma diminuição nesse parâmetro proporciona um aumento no desempenho do circuito. Assim, para uma mesma força magneto motriz, maior será o fluxo magnético ϕ quanto menor for a relutância do circuito.

Uma das formas de se diminuir a relutância do circuito magnético é utilizando materiais ferromagnéticos. Como citado no início no capítulo, os materiais são formados de átomos e os

átomos possuem cargas elétricas em movimento orbital, gerando, assim, o campo magnético *intrínseco*. Embora para alguns materiais ocorra o alinhamento desses campos, gerando o ímã permanente, para a maioria a orientação é aleatória, resultando em um campo nulo. Entretanto, existe uma classe de materiais onde, mesmo com a orientação aleatória dos campos magnéticos *intrínsecos*, existe uma tendência de alinhamento desses campos, gerando assim, uma região conhecida como *domínio magnético*. Este tipo de material é conhecido como material ferromagnético e se diferencia do ímã permanente, principalmente, por apresentar *domínios magnéticos*, mas que, sem a utilização de um campo externo, encontram-se dispostos aleatoriamente, não formando, assim, um campo magnético resultante.

A Figura 4.6 mostra um exemplo de dipolos magnéticos pertencentes a um material ferromagnético em duas situações: (A) dipolos distribuídos aleatoriamente e (B) dipolos alinhados, formando um campo magnético resultante.

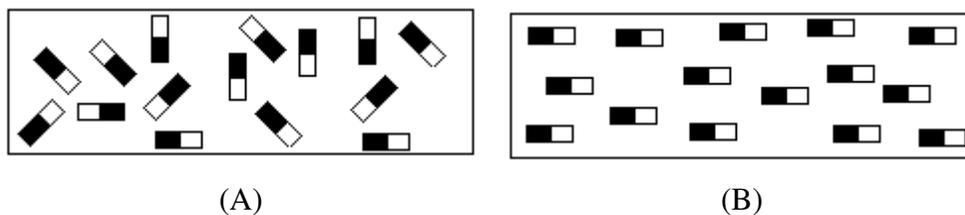


Figura 4.6 – (A) dipolos distribuídos aleatoriamente e (B) dipolos alinhados formando um campo magnético resultante.

Além dos materiais ferromagnéticos, existem duas classes de materiais que também são classificadas de acordo sua interação magnética: os materiais diamagnético e paramagnético.

Nos materiais que apresentam o diamagnetismo, os dipolos magnéticos são alinhados apenas na presença de um campo magnético externo, sendo o campo resultante de baixa intensidade e de sentido contrário ao do campo externo aplicado.

Para o caso onde os materiais exibem o paramagnetismo, os dipolos magnéticos são parcialmente alinhados na presença de um campo magnético externo, sendo o campo resultante de baixa intensidade e de mesmo sentido ao do campo externo aplicado.

Saturação

No material ferromagnético os dipolos magnéticos são alinhados devido à aplicação de um campo magnético externo. Esse alinhamento depende do campo externo aplicado e do tipo de material ferromagnético. O campo externo aplicado exerce influência nos dipolos magnéticos que estavam distribuídos aleatoriamente, alinhando-os. Dessa maneira, o campo magnético resultante, devido ao campo externo aplicado e ao alinhamento dos dipolos, torna-se maior que apenas o campo externo aplicado, observando-se assim uma amplificação. A Figura 4.7 apresenta uma ilustração sobre a influência do material ferromagnético na obtenção do campo magnético resultante. Note que na Figura 4.7 (a) obtém-se a densidade de fluxo magnético B_1 , que pode ser calculada utilizando-se a Equação 4.4 para o caso de um solenóide. Neste caso, utiliza-se a permeabilidade do ar no cálculo da densidade de fluxo magnético. Já na Figura 4.7 (b), o interior do solenóide está preenchido com um material ferromagnético, o que proporciona um aumento da densidade de fluxo magnético obtido (B_2) devido ao alinhamento dos dipolos magnéticos. Neste caso, a densidade de fluxo magnético é calculada utilizando-se a Equação 4.4, mas empregando-se a permeabilidade do material ferromagnético, que é bem maior do que a permeabilidade do ar, obtendo-se uma densidade de fluxo magnético bem maior.

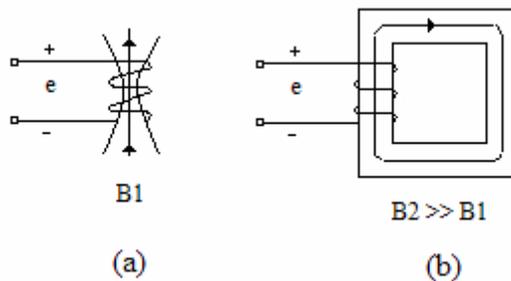


Figura 4.7 – Influência do material ferromagnético na obtenção da densidade de fluxo magnético.

A densidade de fluxo magnético obtida será maior quanto maior for o campo magnético externo aplicado, até que se atinja a total orientação dos dipolos do material ferromagnético. Nesse momento, um acréscimo do campo externo não resultará num aumento substancial da densidade de fluxo resultante, pois sendo a densidade de fluxo resultante formada pelo campo externo e pelo alinhamento dos dipolos magnéticos, apenas a parcela ligada ao campo externo aumentará, sendo que a parcela relacionada aos dipolos não mais se altera, devido ao total

alinhamento dos mesmos. Quando se observa este comportamento, diz-se que o material ferromagnético atingiu sua saturação magnética. A Figura 4.8 mostra um exemplo qualitativo de uma curva de saturação para um material ferromagnético. O campo magnético externo é representado por H . Já a densidade de fluxo magnético, devido ao material ferromagnético, é representada por B .

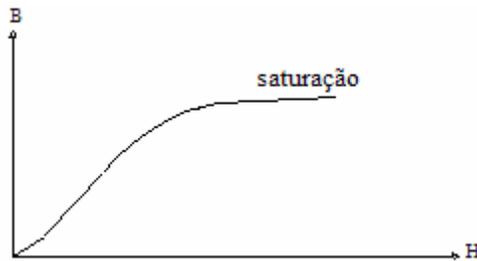


Figura 4.8 – Curva de saturação de um material ferromagnético.

Para o caso dos atuadores magnéticos, que apresentam em seu circuito o entreferro e o material ferromagnético, a saturação do sistema dependerá desses dois parâmetros. Pois, para um entreferro pequeno, a curva de saturação do sistema terá comportamento semelhante à curva de saturação do material ferromagnético, uma vez que a relutância dominante é a relutância do material ferromagnético a alta corrente. Para valores maiores do entreferro, o comportamento do sistema tende a ser mais linear, uma vez que a relutância dominante é a relutância do entreferro e, mesmo para valores altos de corrente, a saturação pode não ser atingida (Chiba et al. 2006a).

Histerese

O processo acima descrito para o material ferromagnético é comumente chamado de magnetização. Para este tipo de material, embora a aplicação de um campo externo conduza a um alinhamento dos dipolos magnéticos, gerando um aumento da densidade de campo magnético resultante, a retirada do campo externo não implica no retorno dos dipolos às suas posições iniciais, o que gera a um campo magnético residual.

Esta propriedade é chamada de histerese e é de grande importância para diversas aplicações conhecidas, como o armazenamento de informações em discos e fitas. Porém, para aplicações

onde o sistema trabalha realizando ciclos de magnetização, a histerese pode levar ao aquecimento indesejado do material ferromagnético.

A Figura 4.9 apresenta uma curva de magnetização de um material ferromagnético. Inicialmente, o material ferromagnético não apresenta nenhuma magnetização, pois nenhum campo magnético externo foi aplicado. Quando se aplica uma corrente no circuito, gera-se um campo magnético externo (H_e) e os dipolos, que anteriormente estavam dispostos aleatoriamente, alinham-se, gerando, assim, uma densidade de fluxo magnético (B_s) até o ponto de saturação (a). Quando essa força magnética externa é removida (corrente), nota-se uma magnetização residual, ponto (b), pois os dipolos não retornam para suas posições iniciais. Aplicando-se o mesmo campo magnético externo, mas com sentido contrário (invertendo-se a corrente), o material ferromagnético apresentará uma densidade de fluxo magnético representada pelo ponto (c). Retirando-se novamente o campo externo, obtém-se o campo magnético residual referente ao ponto (d). A curva $abcd$ é chamada de *laço de histerese* e os pontos b e d mostram que o material ferromagnético está magnetizado, e, nestes pontos, apresentam comportamento semelhante aos ímãs permanentes (Melexis, 2006).

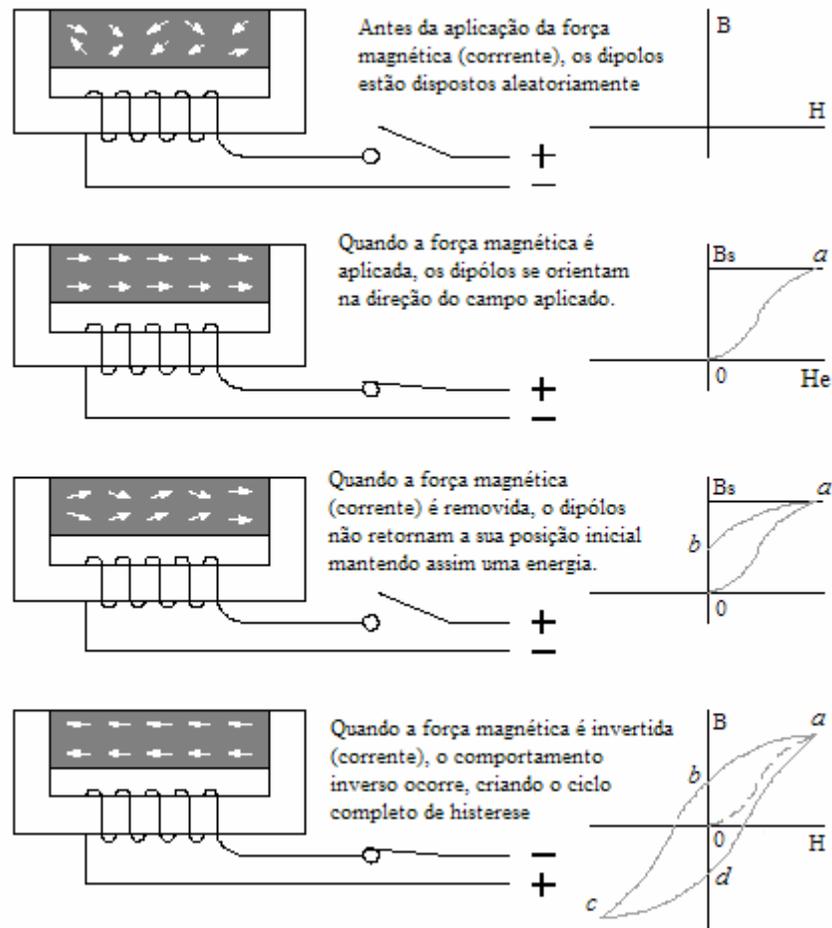


Figura 4.9 – Curva de magnetização de um material ferromagnético e o laço de histerese associado.

Cálculo da Força Magnética

Agora que algumas equações e conceitos básicos foram apresentados, é possível utilizá-los para estimar a força magnética fornecida por um atuador eletromagnético. Para este fim, considere o sistema abaixo, formado por um núcleo, que permanece imóvel, por uma bobina com N espiras e por uma parte móvel presa a uma mola. Aplicando-se uma diferença de potencial nos terminais da bobina, surgirá uma corrente que irá gerar um campo magnético H em torno de cada espira da bobina (Sen, 1997).

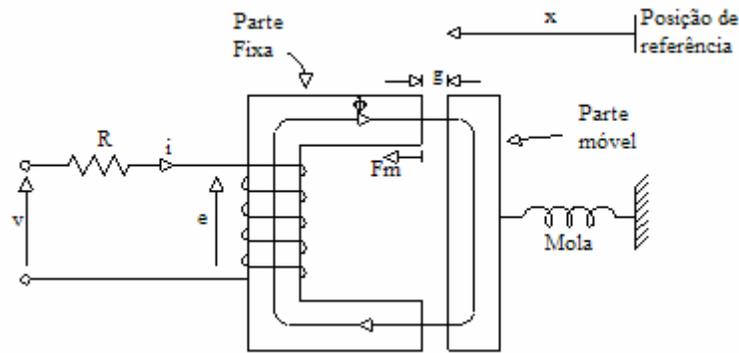


Figura 4.10 – Exemplo de um sistema eletromecânico.

O circuito magnético equivalente do sistema apresentado na Figura 4.10 é apresentado na Figura 4.11. Note que, tanto a relutância do atuador (parte fixa) como a da barra (parte móvel) foram modeladas como sendo a de um único material ferromagnético (R_c), enquanto que a relutância dos dois entreferro (*air gaps*) é representada por (R_g). A força magneto motriz (F_{mm}) é representada por Ni e o fluxo magnético por Φ .

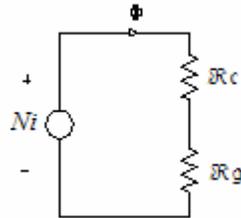


Figura 4.11 – Circuito magnético do sistema apresentado na Figura 4.10.

Para se obter a expressão da força magnética, utiliza-se a lei de Ampère (Equação 4.1) aplicando-se uma *curva amperiana* sobre a linha de fluxo magnético. A Equação 4.9 mostra a lei de Ampère aplicada ao sistema apresentado na Figura 4.10, sendo N o número de espiras da bobina, i a corrente elétrica na bobina, H o campo magnético, l_c e l_g o comprimento da *curva amperiana* passando pelo material ferromagnético e o entreferro respectivamente.

$$Ni = H_c l_c + H_g l_g \quad (4.9)$$

Aplicando-se a Equação 4.2 na Equação 4.9, assumindo área constante e considerando o mesmo fluxo magnético em ambas as regiões (material ferromagnético e entreferro), para o caso de um sistema linear, a Equação 4.9 pode ser rescrita segundo a Equação 4.10 abaixo. Os sub índices c e g indicam as propriedades referentes ao material ferromagnético e o entreferro respectivamente.:

$$Ni = B \left(\frac{l_c}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_g} \right) \quad (4.10)$$

Se considerarmos a relutância do material ferromagnético desprezível, quando comparada com a relutância do entreferro, ou seja, a permeabilidade do material ferromagnético bem maior do que a permeabilidade do ar ($\mu_c \gg \mu_g$), obtém-se:

$$Ni = \frac{Bl_g}{\mu_g} = \frac{2Bg}{\mu_g} \quad (4.11)$$

sendo g a distância do entreferro, considerada igual nas duas regiões.

Desta maneira, quando o número de espiras N e a corrente i são conhecidas, o valor do campo magnético (B) pode ser estimado da forma:

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{2g} \quad (4.12)$$

Considerando o coeficiente de permeabilidade magnético do entreferro igual ao do vácuo ($\mu_g = \mu_0$). Em se tratando de ar, o valor do coeficiente de permeabilidade μ_0 é $4\pi \times 10^{-7}$ (henry/metro).

Segundo Nordmann (2000), a energia magnética por unidade de volume (W_{mag}^*) é dada pela área sob a curva de magnetização $B-H$. Em sua região linear, essa energia pode ser calculada utilizando a Equação 4.13.

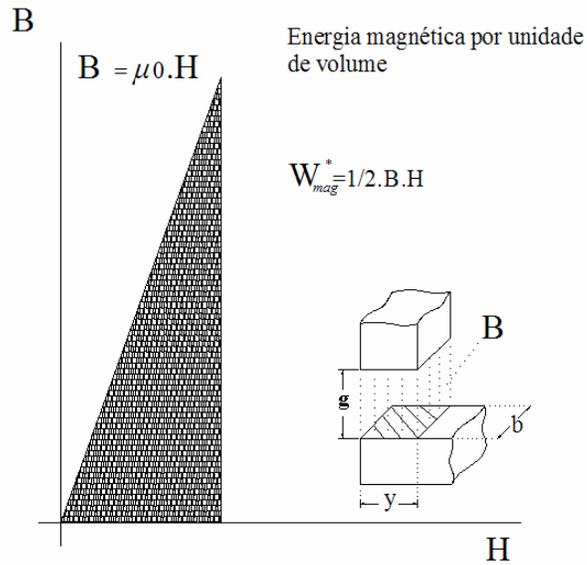


Figura 4.12 – Área sob a curva de magnetização $B-H$ e volume de ar no entreferro.

$$W_{mag}^* = \frac{1}{2} B.H \quad (4.13)$$

Considerando o volume de ar apresentado na Figura 4.12 e aplicando a Equação 4.2 na Equação 4.13, obtém-se o valor da energia magnética armazenada no ar. Note que, na expressão, são considerados os dois volumes do entreferro apresentado na Figura 4.10, assim:

$$W_{mag} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot b.y.g = \frac{B^2}{\mu_0} \cdot b.y.g \quad (4.14)$$

Note que $b.y$ é o cálculo da área A da seção transversal do material ferromagnético.

Igualando a energia mecânica W_{mec} à energia armazenada no campo magnético W_{mag} , um deslocamento infinitesimal dg causa uma mudança na energia mecânica dW_{mec} , assim:

$$F.dg = dW_{mec} = -dW_{mag}$$

$$F = -\frac{dW_{mag}(g)}{dg} \quad (4.15)$$

No caso de um deslocamento na direção do entreferro (g), pode-se aplicar a Equação 4.15 para cálculo da força magnética (F). Nota-se que o valor negativo da força indica sua ação no sentido de diminuir o entreferro. Assim, substituindo a Equação 4.14 na Equação 4.15, tem-se:

$$F = \frac{d}{dg} \left(\frac{B^2}{\mu_0} \times A \times g \right) \quad (4.16)$$

$$F = \frac{AB^2}{\mu_0}$$

A equação acima nos permite calcular o valor da força magnética F por meio da densidade de fluxo magnético B .

Também é possível obter o valor da força magnética utilizando os valores da corrente e do entreferro, ao invés do fluxo magnético. Para isto, basta substituir a Equação 4.12 na Equação 4.16, assim:

$$F = \frac{\mu_0 AN^2 i^2}{4g^2} \quad (4.17)$$

O Efeito Hall

Uma das maneiras de se obter o valor da densidade de fluxo magnético para o cálculo da força magnética é por meio de sensores de efeito Hall. A utilização deste tipo de sensor vem aumentando devido ao desenvolvimento de novos materiais semicondutores e da grande aplicação de sistemas magnéticos na indústria automobilística.

Edwin H. Hall provou, em 1878, que uma corrente passando por um material condutor ou semicondutor, quando imersa em um fluxo magnético, com direção perpendicular ao sentido da corrente, gera um diferencial de potencial dentro do condutor, ou seja, no caso de um condutor longo em forma de fita, em uma das laterais ocorrerá um acúmulo de elétrons e na outra, conseqüentemente, um aumento de cargas positivas, prótons (Halliday et al., 2007).

Com a medida desta diferença de potencial, é possível estimar a densidade de fluxo magnético cruzando perpendicularmente este condutor. A Figura 4.13 mostra um uma placa condutora em três situações distintas: em (a) existe uma corrente (i) passando pela placa, mas nenhum fluxo magnético está atravessando-a, assim as cargas elétricas estão uniformemente distribuídas; em (b) existe um fluxo magnético e pode-se notar um acúmulo das cargas elétricas em uma das extremidades da placa, gerando uma diferença de potencial; em (c) o mesmo ocorre, porém com as cargas se acumulando na direção oposta em relação ao caso anterior, isto porque o fluxo magnético está em sentido contrário (Melexis, 2006).

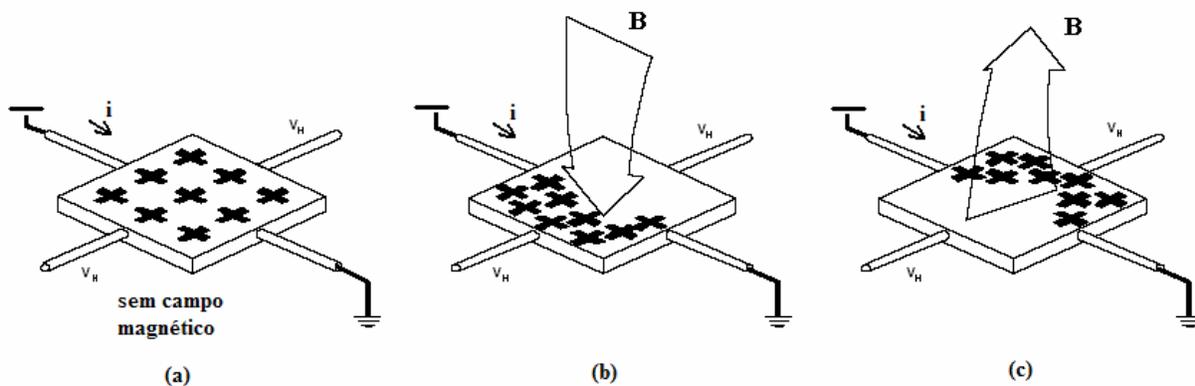


Figura 4.13 – Corrente passando por uma placa condutora; (a) sem fluxo magnético; (b) com fluxo magnético cruzando perpendicularmente (de cima para baixo) e (c) com fluxo magnético no sentido de baixo para cima.

Montagem Diferencial (Linearização)

O atuador apresentado nas seções anteriores é capaz de fornecer apenas força de atração. Este tipo de montagem pode ser aplicada quando se tem a força gravitacional agindo na direção oposta, força essa necessária para estabilização dinâmica do sistema.

Na maioria das montagens, ou quando o atuador é montado na direção horizontal, esta configuração não é adequada, e um par de atuadores é utilizado para prover força em ambos os sentidos (Maslen, 2000). A Figura 4.14 mostra a montagem diferencial utilizando um par de atuadores.

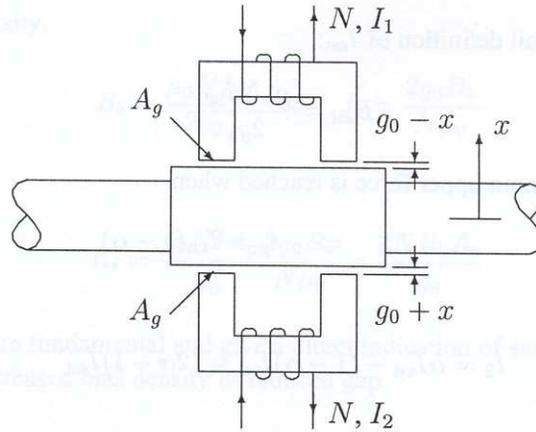


Figura 4.14 – Montagem diferencial utilizando um par de atuadores magnéticos.

A Equação 4.18 mostra o valor da força resultante no caso da montagem acima. A corrente que passa no atuador 1 (superior) é representada por I_1 e a que passa no atuador 2 (inferior) por I_2 . O entreferro é representado por g e x é o deslocamento na direção do atuador.

$$F = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{I_1^2}{(g-x)^2} - \frac{I_2^2}{(g+x)^2} \right) \quad (4.18)$$

Para linearizar o sistema, utiliza-se uma corrente de polarização que será definida como i_b . Assim, a corrente que passa em cada bobina é formada por uma parcela fixa i_b e uma parcela variável i , ou seja:

$$\begin{aligned} I_1 &= (i_b + i) \\ I_2 &= (i_b - i) \end{aligned} \quad (4.19)$$

Desta forma, a Equação 4.18 pode ser reescrita como:

$$F = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{(i_b + i)^2}{(g-x)^2} - \frac{(i_b - i)^2}{(g+x)^2} \right) \quad (4.20)$$

Considerando-se $i_b > i$ e $g > x$, pode-se linearizar o sistema em torno de um ponto de operação, como por exemplo, $(x = x_0)$ e $(i = i_0)$. Aplicando-se a série de Taylor em torno dos pontos previamente mencionados, tem-se:

$$F = F_{x=x_0, i=i_0} + \frac{\partial F}{\partial i}_{x=x_0, i=i_0} (i - i_0) + \frac{\partial F}{\partial x}_{x=x_0, i=i_0} (x - x_0) + \dots \quad (4.21)$$

Define-se, então, ganho do atuador como sendo:

$$k_i \doteq \frac{\partial F}{\partial i}_{x=x_0, i=i_0} \quad (4.22)$$

Da mesma forma, define-se rigidez de malha aberta como sendo:

$$k_x \doteq -\frac{\partial F}{\partial x}_{x=x_0, i=i_0} \quad (4.23)$$

Considerando-se apenas os termos de primeira ordem da série de Taylor, pode-se escrever a força linearizada da seguinte maneira:

$$F = F_0 + k_i (i - i_0) - k_x (x - x_0) \quad (4.24)$$

Para o caso onde x_0 é nulo ($x_0 = 0$) a Equação 4.22 torna-se:

$$k_i \doteq -\frac{\partial F}{\partial i}_{x=x_0, i=i_0} = \frac{\mu_0 N^2 A i_b}{g^2} \quad (4.25)$$

Note que o ganho do atuador (Equação 4.25) é diretamente proporcional à corrente de polarização e inversamente proporcional ao quadrado da distância do entreferro.

Realizando-se a mesma consideração ($x_0 = 0$) para a rigidez de malha aberta (Equação 4.23), tem-se:

$$k_x \doteq -\frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=x_0, i=i_0} = -\frac{\mu_0 N^2 A}{g^3} (i_b^2 - i_0^2) \quad (4.26)$$

Note que a rigidez de malha aberta é *negativa*, aumentando com o aumento da corrente de polarização e diminuindo com a distância do entreferro.

A mesma análise pode ser feita partindo-se da equação que utiliza o fluxo magnético (Equação 4.16). Neste caso, cada um dos atuadores deve manter um fluxo magnético de polarização B_b e um fluxo magnético variável B . Analogamente, tem-se:

$$\begin{aligned} B_1 &= (B_b + B) \\ B_2 &= (B_b - B) \end{aligned} \quad (4.27)$$

Utilizando o fluxo magnético de polarização (Equação 4.27) no sistema formado pelo par de atuadores mostrado na Figura 4.14, a partir da Equação 4.16, tem-se:

$$\begin{aligned} F &= \frac{A}{\mu_0} \left((B_b + B)^2 - (B_b - B)^2 \right) \\ F &= \frac{A}{\mu_0} 4B_b B \end{aligned} \quad (4.28)$$

A Equação 4.28 mostra a força magnética linearizada, utilizando-se um par de atuadores na montagem diferencial, com aplicação de um fluxo magnético de polarização.

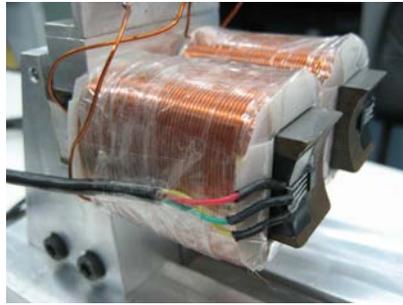
Capítulo 5

Modelo teórico do atuador

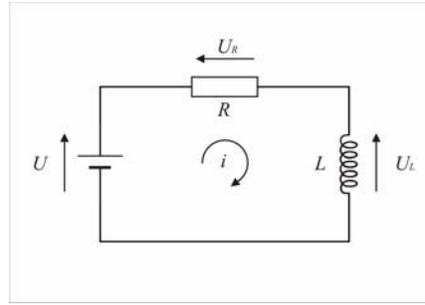
Como já citado, o atuador magnético é um sistema mecatrônico, e neste trabalho, o sistema analisado é composto basicamente de um circuito elétrico (formado pelas bobinas), de um sistema mecânico (que representa o conjunto eixo-rotor) e de um circuito magnético. O conceito básico de eletromagnetismo e as equações básicas que relacionam a corrente com o campo magnético, foram abordadas no capítulo 4 (conceitos básicos de magnetismo). Entretanto, como esses sistemas interagem, é necessário um modelo detalhado dos demais sistemas (circuito elétrico e mecânico) e um estudo para analisar o comportamento do conjunto. Neste sentido, o presente capítulo apresenta o modelo do sistema elétrico, um modelo simples de sistema mecânico e a análise da resposta do sistema mediante de uma excitação dinâmica.

Modelo da bobina

A bobina (Figura 5.1(a)) nada mais é do que um fio de cobre enrolado em torno de um núcleo. A relação entre a corrente que circula a bobina e o campo magnético gerado foi apresentada no capítulo 4, seção 4.4 (solenóide). Porém, para estudar a relação entre a voltagem aplicada (diferença de potencial – ddp) e corrente gerada, pode-se utilizar um modelo *RL* (circuito resistivo-indutivo), como mostra a Figura 5.1(b).



(a)



(b)

Figura 5.1 – Bobina analisada (a); Modelo empregado para a bobina (b).

No modelo da Figura 5.1(b), R representa a resistência, L a indutância, U a voltagem de entrada, U_R a voltagem sobre a resistência, U_L a voltagem sobre a indutância e i a corrente no circuito. As voltagens sobre a resistência e sobre a indutância são dadas pelas Equações 5.1 e 5.2, respectivamente:

$$U_R(t) = R \cdot i(t) \quad (5.1)$$

$$U_L(t) = \frac{d}{dt}(L \cdot i(t)) \quad (5.2)$$

A segunda lei de Kirchoff diz que a soma algébrica das voltagens ao longo de qualquer malha fechada em um circuito elétrico é nula, aplicando-se, desta maneira, esta lei para o modelo apresentado na Figura 5.1(b), conforme Equação 5.3:

$$0 = U(t) - U_R(t) - U_L(t) \quad (5.3)$$

Rearranjando,

$$U(t) = U_R(t) + U_L(t) \quad (5.4)$$

Substituindo-se as Equações 5.1 e 5.2 na Equação 5.4, obtém-se a equação diferencial de primeira ordem do circuito no domínio do tempo, Equação 5.5.

$$U(t) = L \cdot \frac{d}{dt} i(t) + R \cdot i(t) \quad (5.5)$$

Aplicando-se a transformada de Laplace na Equação 5.5 e considerando as condições iniciais nulas, obtém-se a Equação 5.6, a qual, devidamente rearranjada, resulta nas Equações 5.7 e 5.8.

$$U(s) = R \cdot i(s) + L \cdot i(s) \cdot s \quad (5.6)$$

Isolando-se o termo que representa a corrente elétrica, e dividindo-se tanto o numerador como o denominador pela resistência R , obtém-se a Equação 5.7.

$$i(s) = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{L}{R} \cdot s + 1} \cdot U(s) \quad (5.7)$$

Assim, pode-se obter a função de transferência entre a tensão elétrica aplicada e a corrente obtida, utilizando-se a Equação 5.8.

$$\frac{i(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{L}{R} \cdot s + 1} \quad (5.8)$$

Sistema de primeira ordem

Um sistema de primeira ordem pode ser fisicamente representado por um circuito RL (resistivo-indutivo) ou sistemas que apresentem o mesmo comportamento. Para sistemas desse tipo (Figura 5.2) a relação entre a entrada e saída é dada pela Equação 5.9

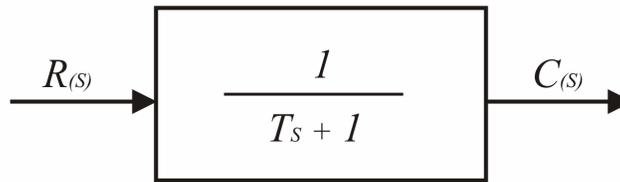


Figura 5.2 – Sistema de primeira ordem.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{T \cdot s + 1} \quad (5.9)$$

Observe que, sistemas que apresentam a mesma função de transferência, apresentam a mesma saída em resposta à mesma entrada.

Resposta do sistema de primeira ordem a uma entrada degrau-unitário

Considerando a função de transferência dada pela Equação 5.9 e considerando as condições iniciais nulas, pode-se obter a resposta deste sistema a uma entrada degrau-unitário, que é utilizada para o estudo de parâmetros importantes do sistema. Sabendo-se que a transformada de Laplace do degrau-unitário é $1/s$, e substituindo $R(s) = 1/s$, obtêm-se a Equação 5.10 (Ogata, 2007).

$$C(s) = \frac{1}{T \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (5.10)$$

Expandindo a resposta $C(s)$ em frações parciais, obtêm-se:

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{T \cdot s + 1} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{T}} \quad (5.11)$$

Aplicando a transformada inversa de Laplace na Equação 5.11, obtêm-se:

$$C(t) = 1 - e^{-t/T} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (5.12)$$

A Equação 5.12 mostra que inicialmente, para $t = 0$, a resposta do sistema $C(t)$ é nula, e com o passar do tempo, tende ao valor unitário. Uma importante característica da resposta exponencial da curva $C(t)$ é que, quando o valor de t iguala-se a constante de tempo T ($t = T$), o valor da saída é de aproximadamente 0.632, ou seja, a resposta do sistema $C(t)$ atinge o valor de 63,2% do valor final, bastando fazer $t = T$ na Equação 5.12.

$$c(t) = 1 - e^{-1} = 0,632 \quad (5.13)$$

Nota-se que, quanto menor for o valor da constante de tempo T , mais rápido o sistema atingirá a resposta. Outra importante característica observada na resposta é o valor da tangente da curva no ponto $t = 0$. Neste caso, a tangente assume valor de $1/T$, como mostra a equação 5.14.

$$\left. \frac{dc}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{1}{T} e^{-t/T} \right|_{t=0} = \frac{1}{T} \quad (5.14)$$

Desta maneira, a saída deveria atingir o valor final no instante de tempo $t = T$ se mantida a velocidade de resposta inicial. A Equação 5.14 mostra que a tangente da resposta $C(t)$ decresce monotonicamente do valor $1/T$ no instante $t = 0$ até zero quando $t = \infty$.

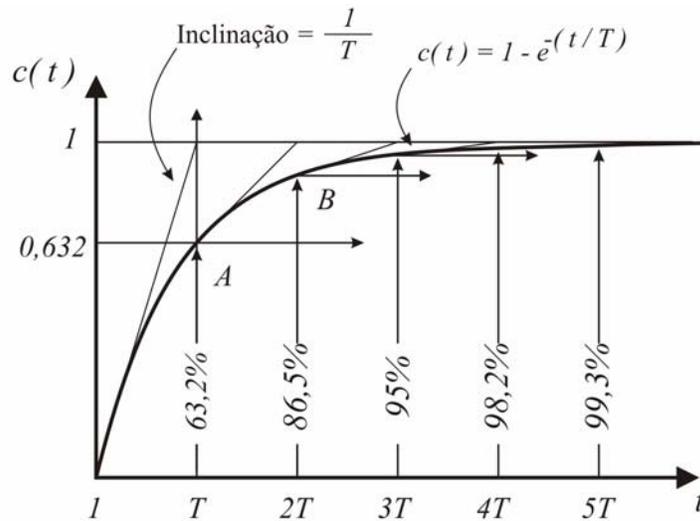


Figura 5.3 – Resposta de um sistema de primeira ordem a entrada degrau-unitário.

A resposta exponencial $C(t)$ é apresentada na Figura 5.3. Nota-se que, após o tempo referente a uma constante de tempo $t = T$, a resposta partiu de 0 e atingiu 63,2% do valor final. Quando se passaram duas constantes de tempo $t = 2T$, a resposta obtida foi de 86,5% do valor final. Para instantes de tempo igual a $t = 3T$, $t = 4T$ e $t = 5T$, as respostas atingem os valores de 95%, 98,2% e 99,3% respectivamente, do valor final. Assim, para $t \geq 4T$, a resposta se mantém dentro de 2% do valor final. Como visto na Equação 5.12, o estado permanente só é matematicamente atingido após o tempo infinito. Na prática, para aproximação da resposta do sistema, considera-se que o sistema atingiu seu valor final quando $t = 4T$, segundo Ogata (2007).

Parâmetros da bobina

Observando a função de transferência entre a corrente obtida e a voltagem aplicada, dada pela Equação 5.8, nota-se a semelhança com a Equação 5.9, que apresenta o modelo de um sistema de primeira ordem. O ganho K é dado por $1/R$ e a constante de tempo é $T = L/R$.

Assim,

$$K = \frac{1}{R} \quad (5.15)$$

$$T = L/R \quad (5.16)$$

O valor do ganho K é utilizado para calcular o valor final da corrente após a aplicação da voltagem, para um instante de tempo $t = \infty$. Já o valor da constante de tempo T é utilizado para estimar a frequência de corte do sistema. Utilizando a Equação 5.16 obtém-se o valor da frequência de corte, Equações 5.17 e 5.18.

$$f_c = \frac{1}{T} = \frac{R}{L} \text{ (rad/s)} \quad (5.17)$$

$$f_c = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot L} \text{ (Hz)} \quad (5.18)$$

Desta maneira, mantendo-se os valores de resistência e indutância, a força aplicada pelo atuador irá diminuir com o aumento da frequência da voltagem aplicada na bobina, sendo a frequência de corte f_c dada pela equação (5.18).

A Figura 5.4 mostra os atuadores 1 e 2 com suas respectivas bobinas. Os valores de resistência e indutância para cada uma das bobinas foram levantados experimentalmente e são utilizados nas Equações 5.19 e 5.20 para se estimar a frequência de corte de cada uma delas. O símbolo Ω indica a unidade de resistência (ohm), o símbolo H indica a unidade de indutância (Henry), já m indica a constante de multiplicação *mili* (1×10^{-3}).

$$f_{c1} = \frac{R_1}{2 \cdot \pi \cdot L_1} = \frac{2 (\Omega)}{2 \cdot \pi \cdot 42 (mH)} \approx 7,58 \text{ (Hz)} \quad (5.19)$$

$$f_{c2} = \frac{R_2}{2 \cdot \pi \cdot L_2} = \frac{2 (\Omega)}{2 \cdot \pi \cdot 44,8 (mH)} \approx 7,11 \text{ (Hz)} \quad (5.20)$$

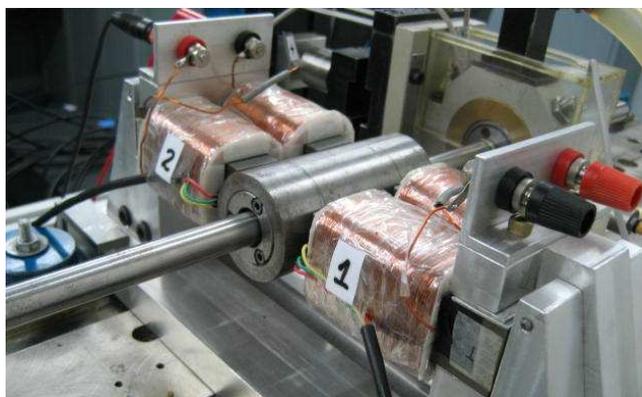


Figura 5.4 – Atuadores 1 e 2 e suas respectivas bobinas.

Para estudo do comportamento da bobina, o modelo apresentado foi desenvolvido em Matlab Simulink e posteriormente acoplado em um modelo mais amplo, contendo o modelo dos demais componentes que constituem o atuador magnético. A Figura 5.5 abaixo apresenta o modelo em Matlab Simulink da bobina.

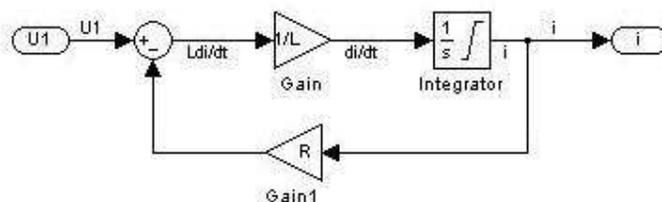


Figura 5.5 - Modelo em Matlab Simulink da Bobina.

Modelo do amplificador

Uma vez gerado o sinal de excitação, é necessário adicionar potência, fornecendo energia para suprir a corrente elétrica na bobina e gerar a força magnética. Para que isto ocorra, utilizam-se amplificadores de potência.

O amplificador empregado é apresentado na Figura 5.6. Trata-se de um amplificador PWM da marca Z&B, modelo “Servo-Leistungsregler V1”. Este equipamento é normalmente utilizado em servo motores com potência entre 60 a 840 W, apresenta corrente máxima de 10A e uma frequência de chaveamento de 50kHz.



Figura 5.6 – Amplificador utilizado.

O amplificador também teve seu modelo desenvolvido em Matlab Simulink, o qual foi posteriormente inserido no modelo global do atuador. A Figura 5.7 apresenta o modelo do amplificador, onde foi utilizado o ganho, levantado experimentalmente para cada um dos dois amplificadores utilizados, e a função “atraso”, que tem como objetivo simular o atraso na resposta devido à frequência de chaveamento.

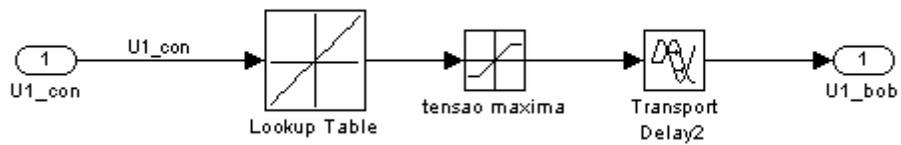


Figura 5.7 - Modelo em Matlab Simulink do amplificador.

Modelo do sistema mecânico

O sistema mecânico analisado é apresentado na Figura 5.8(a). Trata-se de um rotor Laval, com distância de 600mm entre os mancais, massa na posição central com cerca de 2,3kg e diâmetro de 12mm do eixo de aço. Na Figura 5.8(a), este rotor é modelado considerando os mancais rígidos. Desta maneira, para uma primeira análise, pode-se modelar o sistema como

sendo um sistema com 1 g.d.l. representado pelo sistema massa, mola e amortecedor indicado na Figura 5.8(b).

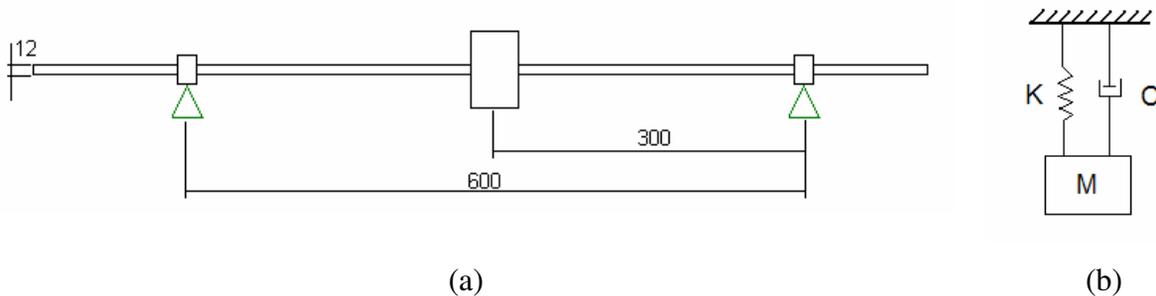


Figura 5.8 – Dimensões do rotor analisado (a) e modelo simplificado (b).

Embora o modelo apresentado na Figura 5.8(b) apresente consideráveis limitações, foi utilizado para representar a interação entre os sistemas mecânico e magnético no modelo global do atuador, e não com o objetivo de estudar de forma detalhada o comportamento dinâmico do rotor. Para isto, foi desenvolvido um modelo em elementos finitos empregando o software para sistemas rotativos *RotorTest*®.

A Figura 5.9 mostra o modelo do sistema de segunda ordem, desenvolvido em Matlab Simulink, para representar o sistema mecânico. A massa do sistema foi considerada a massa total de 3kg (2,3kg do rotor e 0,7kg do eixo), a rigidez equivalente foi calculada utilizando-se a aproximação da rigidez de eixos em sistemas rotativos representados como 1g.d.l., como mostra Groehs (2001). A Equação 5.21 mostra o cálculo da rigidez mecânica equivalente, empregando-se as propriedades do aço e parâmetros do eixo, sendo E o módulo de elasticidade, I o momento de inércia e L o comprimento do eixo entre os mancais. O amortecimento empregado é o estrutural, considerado como sendo 1% da rigidez.

$$K_{eq} = \frac{48 \cdot E \cdot I}{L^3} = \frac{48 \cdot 210 \times 10^9 \text{ (Pa)} \cdot 555 \text{ (m}^4\text{)}}{0,6^3 \text{ (m}^3\text{)}} \approx 47,5 \times 10^3 \text{ (N/m)} \quad (5.21)$$

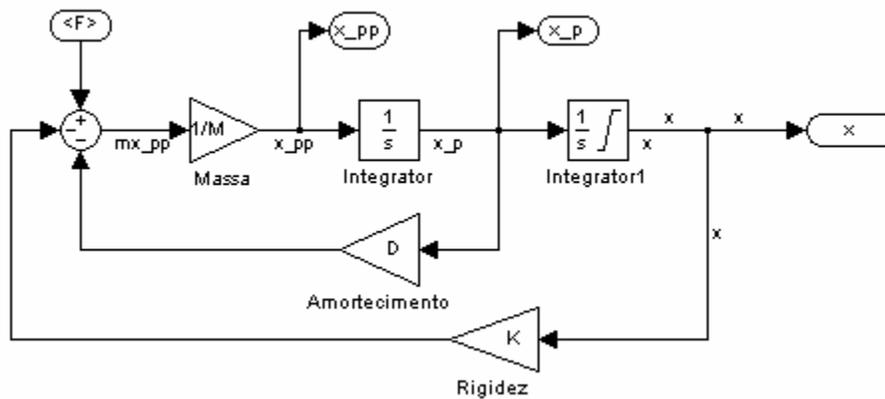


Figura 5.9 – Modelo em Matlab Simulink do sistema mecânico.

Como citado nos parágrafos anteriores, o modelo do sistema mecânico acima descrito apresenta uma série de limitações. Neste sentido, o sistema real apresentado na Figura 5.10, foi também modelado, utilizando-se o método dos elementos finitos (MEF). Este é um modelo mais refinado, quando comparado com o anterior, pois nele é possível analisar os efeitos dos mancais hidrodinâmicos, o efeito da luva, além de utilizar os recursos disponíveis no software de Simulação *RotorTest*®, tais como: deslocamentos nos mancais, análise de órbita, análise dos modos de vibração, entre outros.

A luva inserida no eixo na região do atuador tem como objetivo aumentar a área de atuação do atuador aumentando, e assim, a força magnética gerada. Este efeito pode ser observado na equação 4.16 onde é possível notar a relação direta entre a força e a área do pólo do atuador. Entretanto, para que isto ocorra, é necessário que a luva seja feita de material ferromagnético para que, desta forma, seja possível obter o circuito magnético como mostrado na Figura 4.10.

A Figura 5.10 abaixo mostra o rotor real, enquanto a Figura 5.11 apresenta o modelo em elementos finitos do rotor estudado.

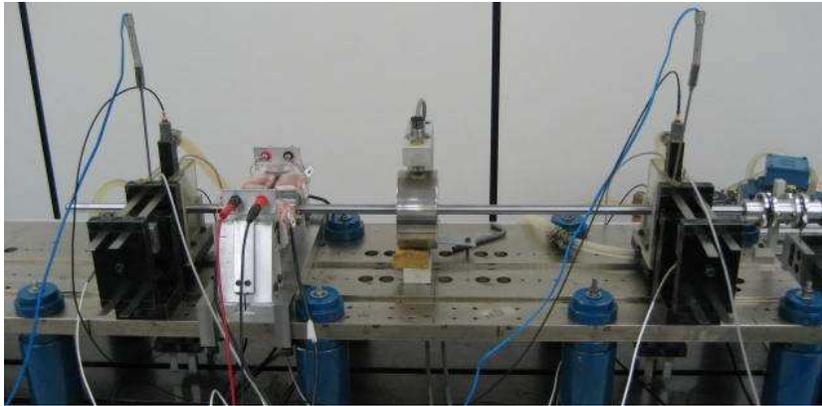


Figura 5.10 – Rotor Laval analisado.

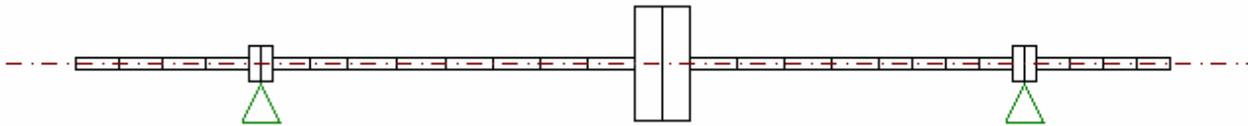


Figura 5.11 – Modelo em elementos finitos do rotor Laval.

Com o modelo de elementos finitos, pôde-se realizar um estudo sobre a influência da luva na resposta ao desbalanceamento do rotor. O interesse é o de avaliar se a inserção da luva, necessária para aumentar a força magnética, apresenta grande influência na resposta dinâmica do sistema. A Figura 5.12 mostra o mesmo modelo de rotor apresentado na Figura 5.11, porém com a inserção da luva.

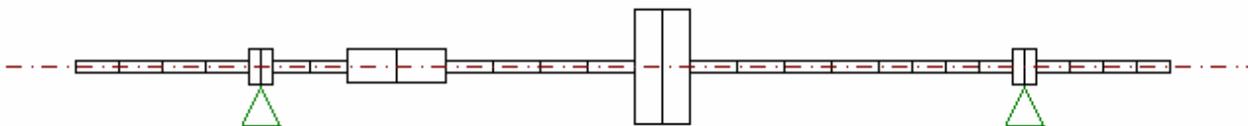


Figura 5.12 – Modelo em elementos finitos do rotor Laval com luva.

A resposta ao desbalanceamento para o modelo em elementos finitos, com e sem a luva, é apresentada na Figura 5.13. Esta resposta refere-se ao ponto central do eixo, ou seja, onde se localiza o nó correspondente à massa concentrada. A força de desbalanceamento foi inserida no mesmo nó e a velocidade de rotação analisada foi de 0 até 150Hz.

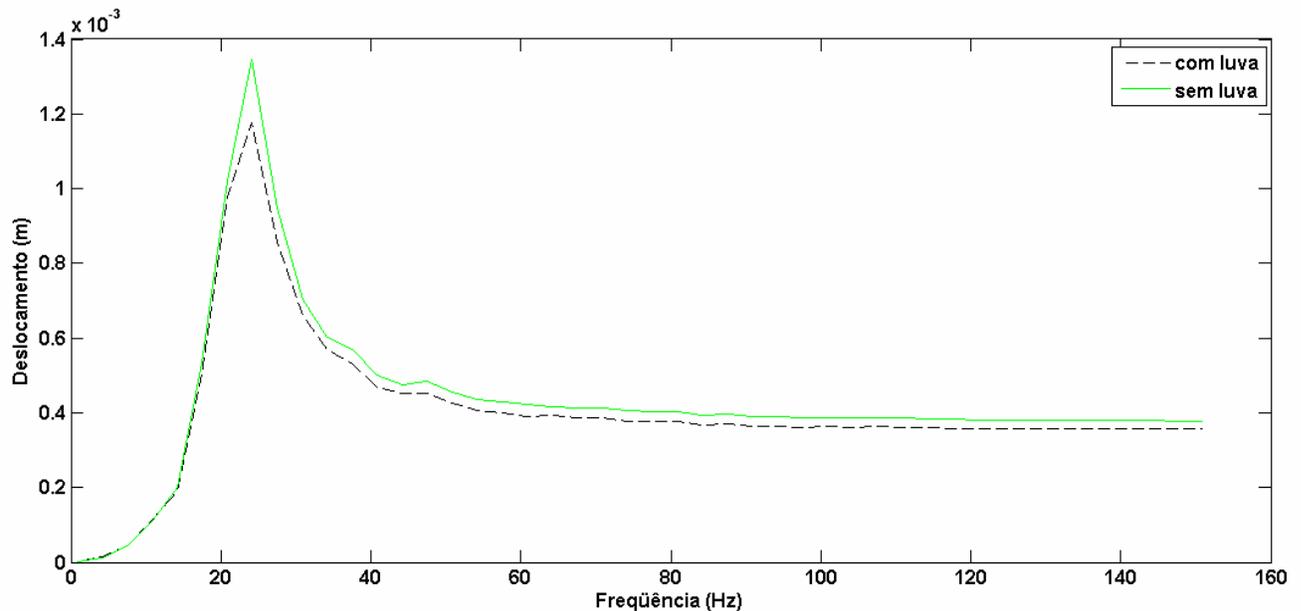


Figura 5.13 – Resposta ao desbalanceamento da massa central, em metros, para o modelo com e sem a presença da luva.

A mesma análise foi feita, porém para o nó correspondente à posição da luva (Figura 5.14). Note que em ambos os casos, as amplitudes obtidas para o modelo sem a luva foram ligeiramente maiores que as obtidas quando acrescentou-se este componente. Observa-se, também, que a diferença entre as frequências naturais, para os dois casos, foi muito pequena, o que sugere que, neste caso, o emprego da luva não altera significativamente o comportamento do sistema, indicando que o atuador magnético pode ser instalado sem grande prejuízo no ciclo normal de operação da máquina. É óbvio que esta influência depende do posicionamento da luva e de sua dimensão, sendo que esta, portanto, para o caso analisado, não se mostrou significativa.

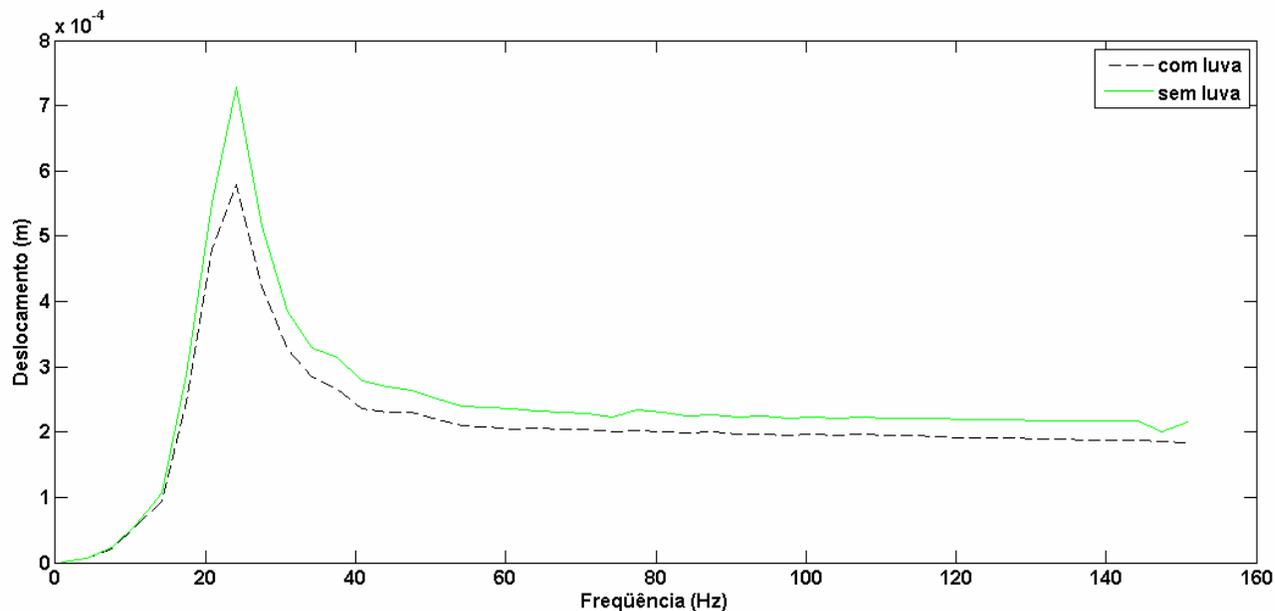


Figura 5.14 – Resposta ao desbalanceamento da luva, em metros, para o modelo com e sem a presença da mesma.

Na realidade, os resultados precedentes também indicam que a simplificação utilizada no primeiro modelo mecânico, considerando-o como um sistema de 1 g.d.l., apresentou resultados satisfatórios uma vez que, empregando a Equação 5.21 e utilizando a massa total de 3kg, chega-se ao valor aproximado de 20Hz para a primeira freqüência natural, enquanto que o valor encontrado, utilizando o MEF, foi de aproximadamente 22Hz para a mesma freqüência.

Este é um ponto importante, pois o modelo desenvolvido em Matlab Simulink tem como objetivo auxiliar no estudo do comportamento do atuador de maneira global, e desta maneira, pode-se dizer que o sistema mecânico está satisfatoriamente representado, pelo menos no que tange a primeira freqüência natural.

Modelo global do atuador magnético

Sendo o atuador magnético um sistema mecatrônico composto por vários componentes, o comportamento do sistema como um todo depende do comportamento dos vários subsistemas que o compõe. Neste sentido, como apresentado anteriormente, foi desenvolvido o modelo dos

principais subsistemas: força magnética, circuito elétrico (bobina), amplificador de corrente e sistema mecânico com 1 grau de liberdade. A Figura 5.15 mostra o modelo completo do atuador magnético e seus subsistemas representados por blocos. A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros empregados na simulação, com suas unidades no SI.

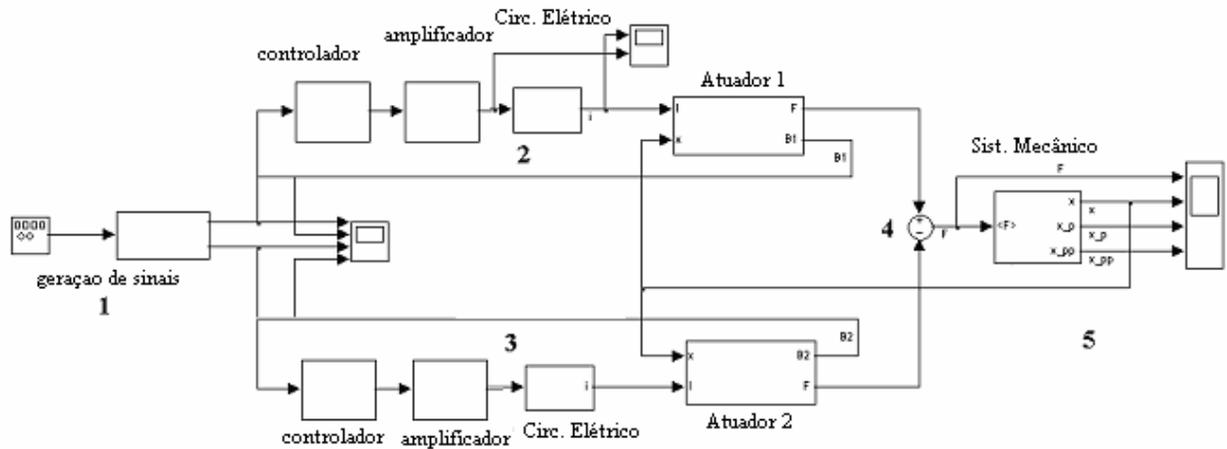


Figura 5.15 – Modelo global do atuador magnético.

Os números apresentados na Figura 5.15 representam os subsistemas modelados. O número 1 refere-se ao sinal de excitação com dois canais de saída. O número 2 representa o controlador de fluxo de densidade, o amplificador de corrente, o circuito RL da bobina e a força magnética obtida pela Equação 4.16, isto para um atuador. O número 3 é o mesmo modelo acima descrito, porém para o outro atuador. A força resultante é obtida na região de número 4 e é aplicada no sistema mecânico na região 5.

Tabela 5.1 – Parâmetros mecânico, elétrico e magnético utilizados no modelo do atuador.

Sistema Mecânico	Sistema Elétrico (Bobinas)	Atuador
Massa = 3 kg Rigidez = $45,7 \times 10^3$ N/m Amortecimento = 457 Nm/s	Indutância $L1 = 42,0 \times 10^{-3}$ H Indutância $L2 = 44,8 \times 10^{-3}$ H Resistência = 2 Ω	Área = 500 mm ² Voltas = 830 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A Entreferro = $2,5 \times 10^{-3}$ m

O controle da amplitude e frequência de excitação são características desejáveis para o atuador magnético, pelo fato de serem utilizados diferentes tipos de sinais na análise modal. Observando-se a Equação 5.8 nota-se que, com o aumento da frequência de excitação, ocorre uma diminuição na corrente e, conseqüentemente, uma diminuição na força obtida.

As Equações 5.19 e 5.20 mostram que, para os parâmetros elétricos utilizados, a frequência de corte da bobina, e conseqüentemente do sistema, encontra-se em cerca de 7 Hz. A Figura 5.16 mostra o diagrama de Bode entre o sinal de excitação e a densidade de fluxo magnético gerado para o modelo do atuador aqui descrito.

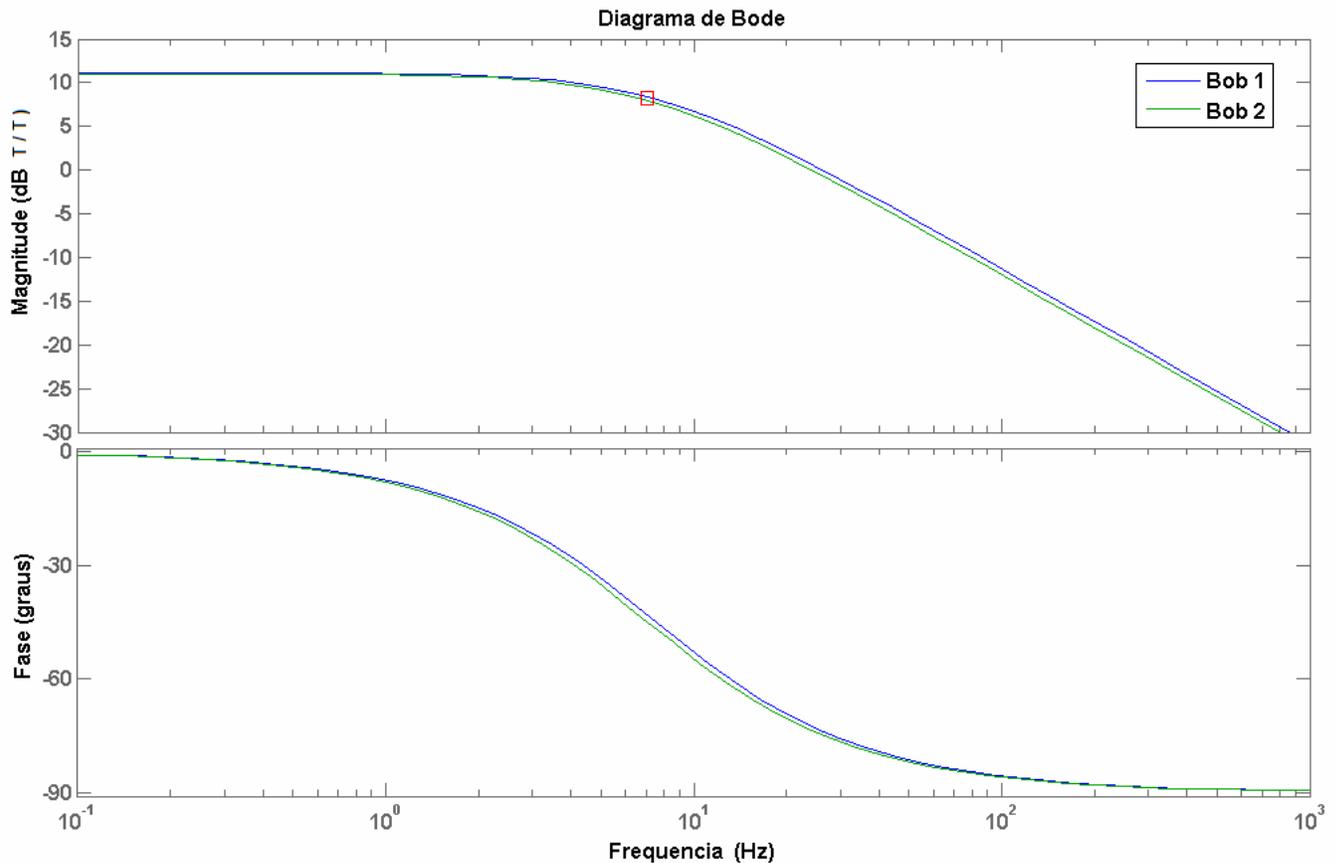


Figura 5.16 – Diagrama de Bode entre o sinal de excitação e a densidade de fluxo magnético para o modelo do atuador magnético.

O ponto em destaque indica a região onde o decaimento da amplitude é de 3dB. O que enfatiza a baixa frequência de corte do sistema da maneira como se encontra.

Para melhorar o desempenho do sistema, sem aumentar a complexidade e os custos envolvidos, foi projetado um controlador simples do tipo proporcional (P). Este controlador tem a função de controlar a densidade de fluxo magnético através de sensores de efeito hall (*hall sensors*). Desta maneira, o sinal de entrada dependerá da diferença entre o sinal desejado e o sinal medido, multiplicado por um ganho.

A Figura 5.17 mostra o diagrama de Bode entre o sinal de excitação e a densidade de fluxo magnético para o modelo do atuador, porém com o emprego de um controlador de densidade de fluxo. Nota-se que houve um aumento expressivo da frequência de corte do sistema, de 7(Hz) para cerca de 700(Hz), além de um controle mais efetivo na amplitude de vibração, considerando cerca de 0dB na região inicial da curva.

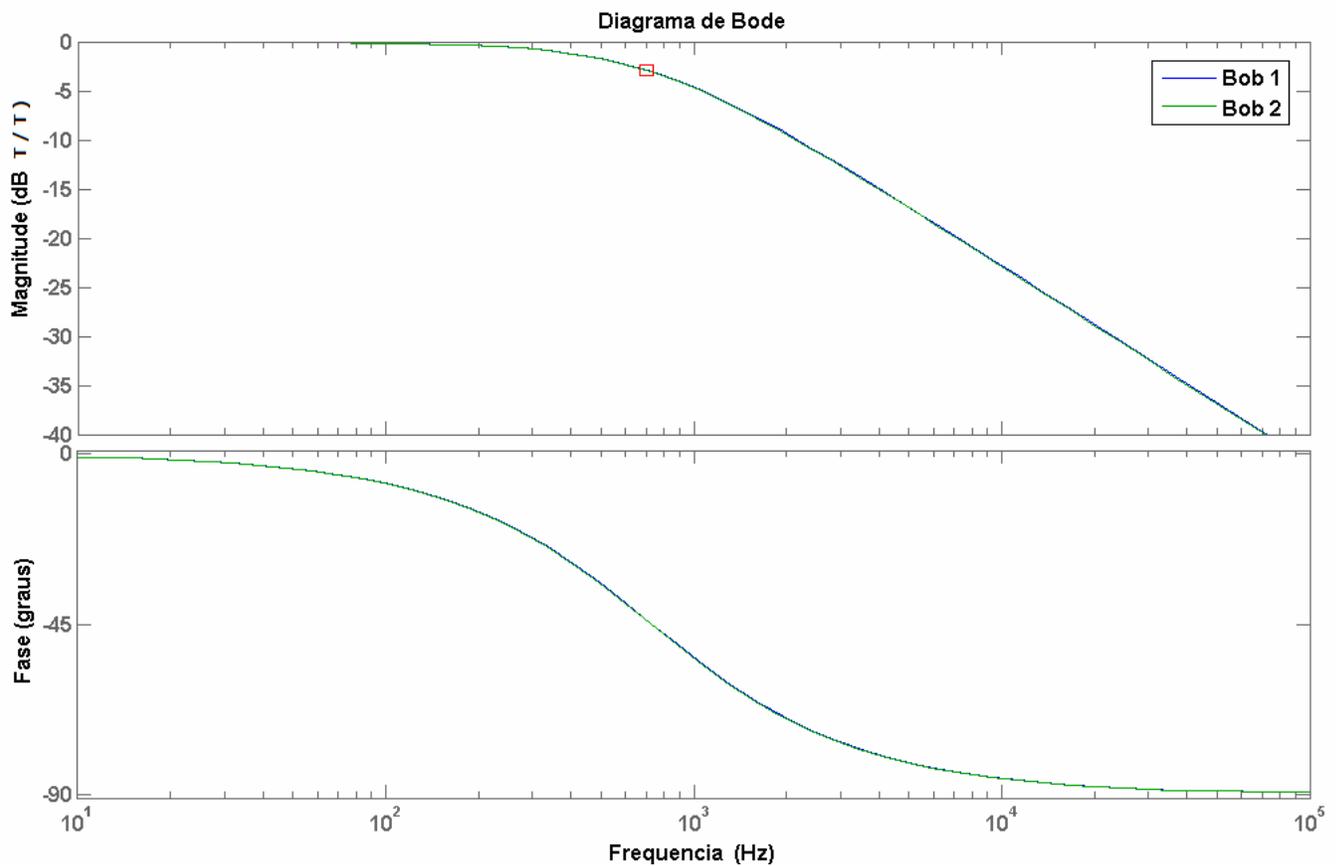


Figura 5.17 – Diagrama de bode entre o sinal de excitação e a densidade de fluxo magnético para o modelo do atuador magnético, com controlador de fluxo densidade.

Pelo fato de se obter uma resposta satisfatória, tanto na amplitude como na frequência de corte, e pelo fato do controlador proporcional ser um sistema economicamente acessível e simples de ser implementado analogicamente, optou-se por este tipo de controle para ser empregado no atuador magnético.

Modelo do suporte mecânico do atuador magnético

Embora o modelo anterior tenha indicado um valor elevado da frequência de corte, com o atuador utilizando o controlador de densidade de fluxo, deve-se garantir que a estrutura de suporte do atuador apresente frequências naturais fora da faixa de operação. Neste sentido, foram criados vários suportes mecânicos, objetivando-se otimizar o projeto com relação às limitações de espaço e às primeiras frequências naturais.

Dentre os projetos estudados, o que apresentou melhor relação entre custo, possibilidade de construção e flexibilidade de utilização, é apresentado na Figura 5.18. Este projeto foi desenvolvido no software Pro-Engineer®.

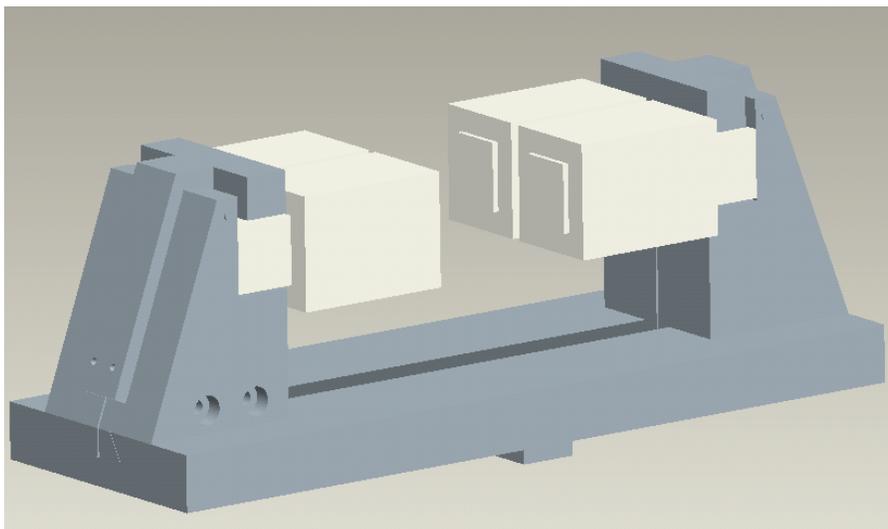


Figura 5.18 – Projeto do suporte mecânico do atuador.

A cor mais escura representa a base e o suporte dos atuadores feitos de duralumínio. Já o atuador e as bobinas, são representados pela cor mais clara.

O modelo CAD deste suporte foi importando para o software de elementos finitos ANSYS® permitindo verificar as primeiras frequências naturais do suporte. A Figura 5.19 mostra o modelo em elementos finitos do suporte do atuador com os atuadores e as bobinas montados.

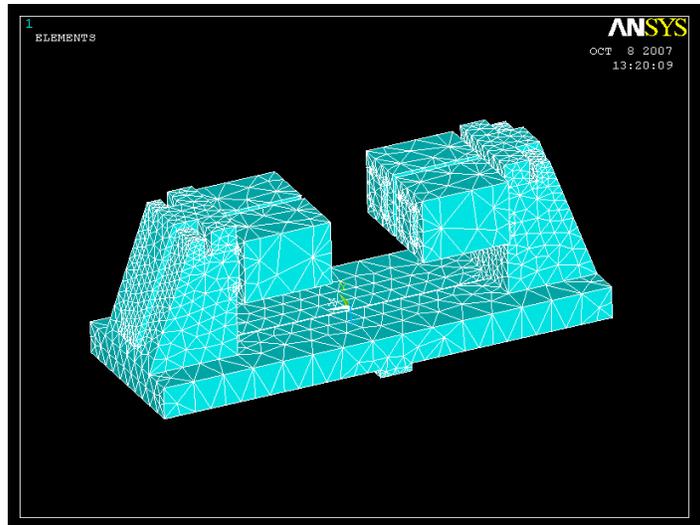


Figura 5.19 – Modelo em elementos finitos do suporte mecânico do atuador.

As Figuras 5.20 e 5.21 mostram o primeiro e o segundo modo de vibrar do sistema, respectivamente. A primeira frequência natural é cerca de 1212 Hz, e a segunda está perto de 1333 Hz.

Ambas as frequências estão bem acima da frequência de operação do atuador, pois como o objetivo é excitar as primeiras frequências naturais do rotor e, segundo o modelo de elementos finitos (Figura 5.13) estas frequências estão entre 20 e 23 (Hz), pode-se considerar este projeto de suporte válido para a aplicação desejada.

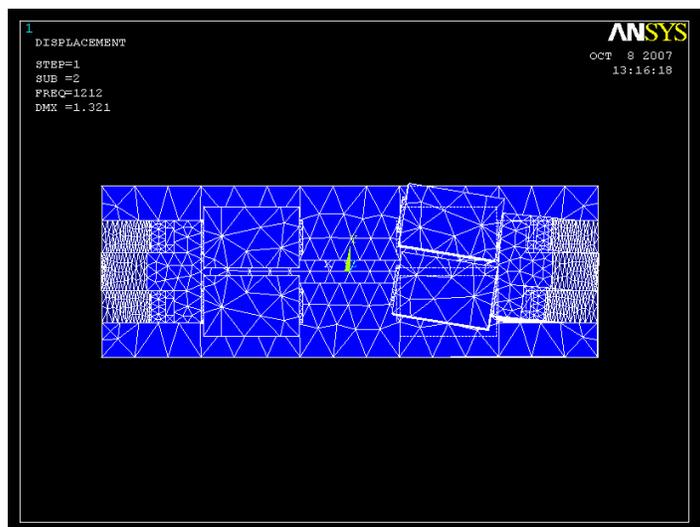


Figura 5.20 – Primeiro modo de vibrar do suporte mecânico do atuador.

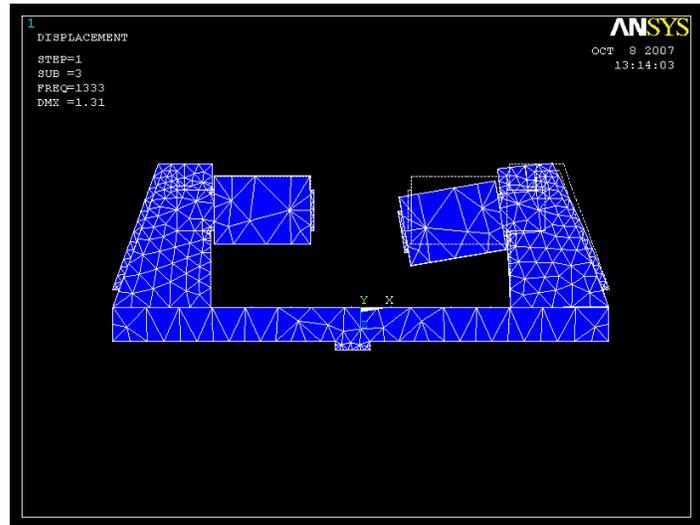
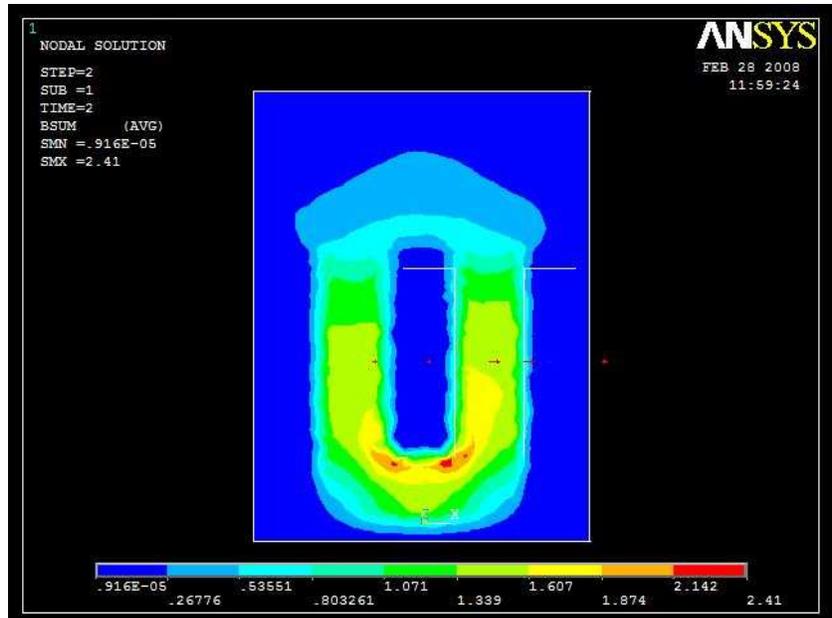


Figura 5.21 – Segundo modo de vibrar do suporte mecânico do atuador.

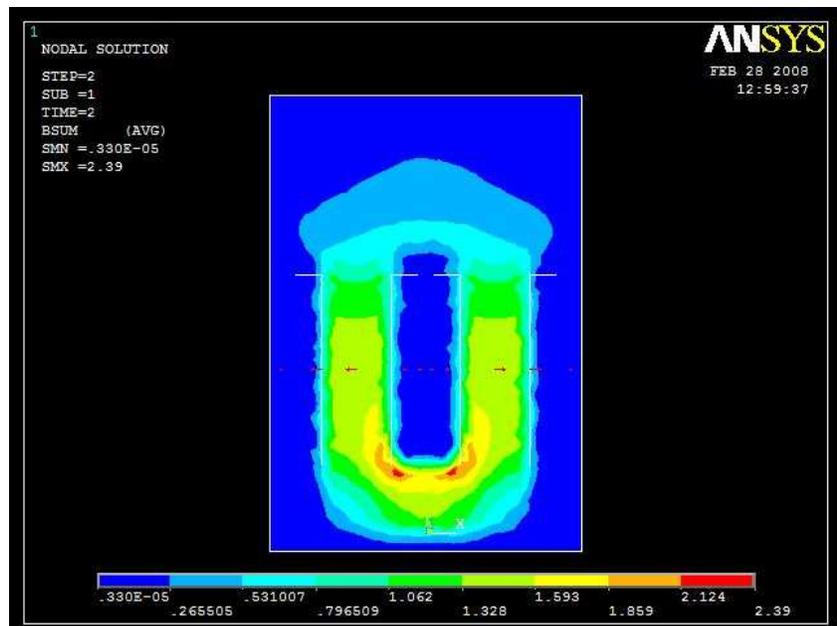
Distribuição das bobinas no atuador magnético

Apesar da Equação 4.12 levar em consideração a influência da quantidade de espiras N e da corrente que passa pela bobina i no cálculo da densidade de fluxo magnético B , esta não fornece informação sobre a influência do posicionamento da bobina junto ao núcleo do atuador. Analiticamente, este posicionamento não interfere no cálculo da densidade de fluxo magnético que, posteriormente, será utilizado na estimativa da força magnética (Equação 4.16). Porém, aplicando-se a modelagem pelo método de elementos finitos, observa-se que a distribuição da densidade de fluxo magnético é afetada pelo posicionamento e distribuição das bobinas.

A Figura 5.22(a) mostra a densidade de fluxo magnético obtida com o atuador contendo uma bobina com 830 espiras, localizada no braço direito do material magnético, sob uma corrente de 3A. A Figura 5.22(b) traz a mesma bobina, porém, distribuída igualmente nos dois braços do material magnético. Note que, neste caso, a ligação das bobinas deve ser em série. Para estas simulações, utilizou-se um entreferro de 2.5mm e área do pólo igual a 500 mm^2 e, tanto o atuador como a luva, foram simulados contendo superfícies planas.



(a)



(b)

Figura 5.22 – Densidade de fluxo magnético:(a) bobina localizada no braço direito; (b) bobina igualmente distribuída em ambos os braços do núcleo.

Observando-se a Figura 5.22(a) é possível verificar que a densidade de fluxo magnético no entreferro é maior na região próxima à bobina, ou seja, no braço direito do atuador. Como a força magnética é diretamente proporcional à densidade de fluxo, ocorre um desbalanço de força,

obtendo-se, assim, uma força de maior intensidade no pólo próximo a região da bobina. Na Figura 5.22(b) a distribuição de força se deu de forma mais uniforme, devido ao comportamento praticamente simétrico da densidade de fluxo magnético. Portanto, quando a quantidade de espiras é igualmente distribuídas em ambos os braços do material magnético, Figura 5.22(b), a obtenção da força magnética ocorre de maneira uniforme, minimizando efeitos de momento em relação ao centro do atuador.

Influência do perfil do pólo no cálculo da força magnética

Uma das aproximações utilizadas no cálculo da força magnética, empregando-se a Equação 4.17, é a utilização de um entreferro constante e uma distribuição uniforme da densidade de fluxo magnético. No caso de superfícies planas, esta consideração é razoável. Porém, para casos onde as superfícies não apresentem esta característica, a estimativa da força, empregando-se a Equação 4.17, pode ser comprometida devido à variação do entreferro na extensão do pólo. Neste sentido, foram criados três modelos em elementos finitos para verificar a influência das superfícies (da luva e do pólo do atuador) no cálculo da força magnética.

A Figura 5.23 mostra o modelo de elementos finitos criado para cada uma das três diferentes combinações de superfícies estudadas: (S1) – luva plana com o pólo do atuador plano; (S2) – luva circular com o pólo do atuador plano e (S3) – luva circular com o pólo do atuador circular. Tanto para o caso S1 como para o caso S3 o entreferro foi mantido constante com valor de 2.5mm, já no caso S2, 2.5mm representa a região mais estreita do entreferro. No caso em que se utilizou a luva com superfície circular, o diâmetro empregado foi de 40mm.

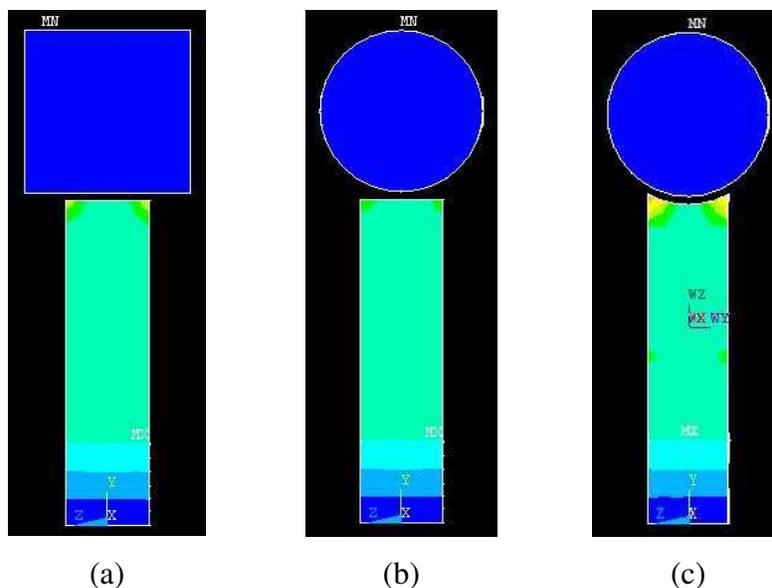


Figura 5.23– Três diferentes combinações de superfícies utilizadas no cálculo da força magnética: (a) plana – plana, (b) plana – circular e (c) circular – circular.

A Tabela 5.2 apresenta, para cada uma das combinações de superfícies estudadas, o valor da força magnética obtidas por MEF, empregando-se os mesmos parâmetros utilizados no estudo da distribuição da densidade de fluxo magnético (corrente de 3A e bobina com 830 espiras), além do cálculo da força magnética, empregando-se a Equação 4.16. Para o cálculo da força magnética utilizando a Equação 4.16, adotou-se como base a densidade de fluxo magnético obtida por MEF na região central do pólo do atuador. Para o caso ideal, empregando-se a Equação 4.17, o valor da força obtida é de aproximadamente 155,75N.

Tabela 5.2 – Forças obtidas, variando-se a geometria da superfície do pólo e da luva.

Geometria	(a) – S1	(b) – S2	(c) – S3
Força por MEF (N)	196,38	102,44	187,64
Força pela Eq. 4.16 (N)	160,97	143,16	181,23

Pode-se observar que, nas simulações, a força obtida no caso S2 é a menor, pois a área onde o entreferro possui 2.5mm é reduzida, causando uma maior perda de fluxo magnético no restante do entreferro. A força estimada pela Equação 4.16, neste caso, foi maior que a obtida pela

simulação por MEF, pelo fato da equação não levar em conta a questão da geometria, e o fluxo magnético ser maior na região onde o entreferro é menor, conforme observado no mapeamento da densidade de fluxo mostrado na Figura 5.25(c).

Nos casos S1 e S3 as forças simuladas foram maiores, pois como o entreferro é constante o fluxo magnético tende a se comporta de maneira uniforme. O caso S1 apresentou maiores magnitudes de forças simuladas devido à proximidade de toda a área da luva junto ao pólo do atuador. Entretanto, o valor do fluxo magnético no centro do pólo do atuador foi maior para o caso S3, mantendo-se uma distribuição mais uniforme em toda superfície do pólo, quando comparado com o caso S1, Figura 5.25(c) e Figura 5.25(a). Isto explica porque o valor da força obtida utilizando-se a Equação 4.16 foi maior para o caso S3 do que para o caso S1.

Desta forma, pode-se afirmar que o caso S3 foi o que apresentou melhor estimativa da força magnética, empregando-se a Equação 4.16, tendo-se como base os valores obtidos pela simulação numérica.

Como a aplicação do atuador visa a sua utilização como fonte de excitação externa em sistemas rotativos, e sendo o eixo um sistema com geometria circular, o caso S3 (circular – circular) foi adotado como padrão e utilizado na montagem experimental. A Figura 5.24 mostra o modelo de EF utilizado para as análises do atuador magnético com o perfil circular – circular.

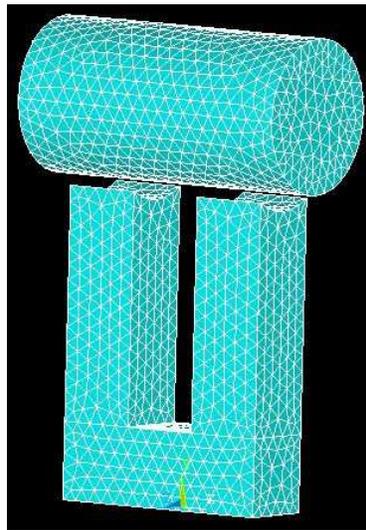
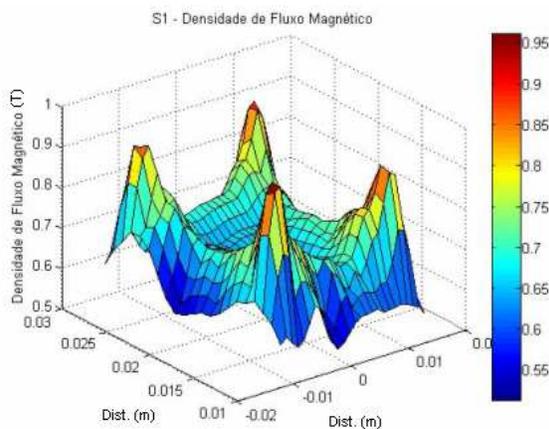


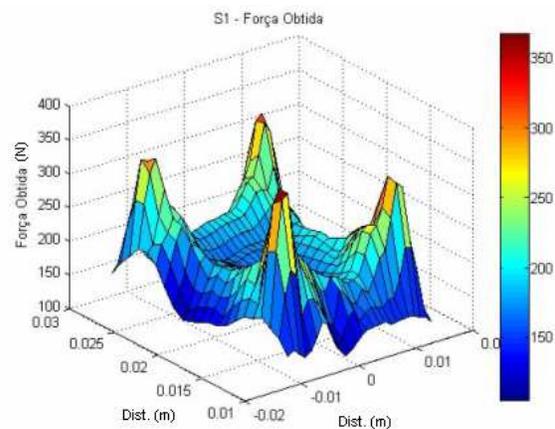
Figura 5.24– Modelo em elementos finitos do atuador magnético.

Para estimativa experimental do valor da força magnética, utilizou-se a Equação 4.16. Nesta equação, a força é estimada através do valor da densidade de fluxo magnético, obtida no centro do atuador e, sendo esta uma relação de ordem quadrática, uma pequena variação na sua medição pode causar uma grande variação na estimativa da força magnética.

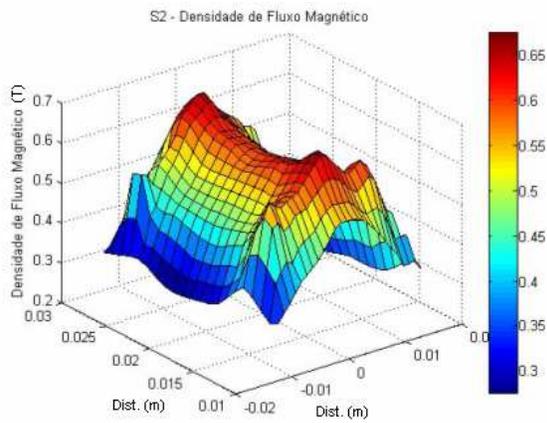
Para medir a densidade de fluxo magnético, foram utilizados sensores de efeito hall e, como esses sensores têm uma área sensível de aproximadamente $0,04\text{mm}^2$ seu posicionamento pode ter influência no cálculo da força caso a densidade de fluxo não seja constante dentro do entreferro. Neste sentido, foram realizados os mapeamentos dos valores de densidade de fluxo magnético e da força obtida na região do entreferro, para cada uma das três combinações de superfícies estudadas. As Figuras 5.25(a), 5.25(c) e 5.25(e) mostram a densidade de fluxo magnético na região central do entreferro, junto ao material magnético para cada um dos casos S1, S2 e S3. As figuras 5.25(b), 5.25(d) e 5.25(f) mostram os valores das forças calculadas, tendo-se como base a distribuição da densidade de fluxo magnético para cada caso. Em todos os casos, empregou-se uma malha de pontos com 1mm de distância.



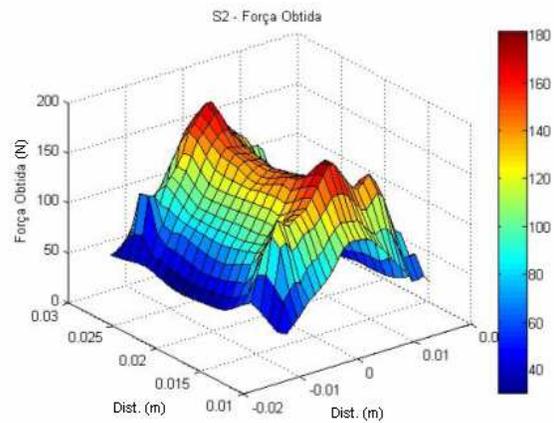
5.25(a)



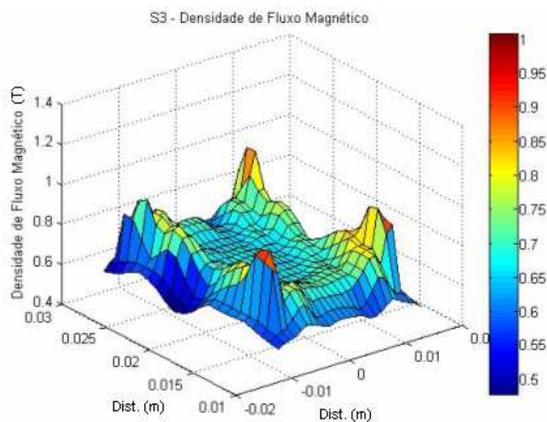
5.25(b)



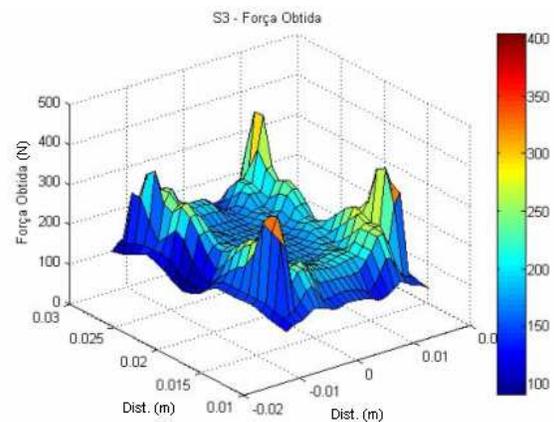
5.25(c)



5.25(d)



5.25(e)



5.25(f)

Figura 5.25– Mapeamento da densidade de fluxo magnético e força obtida para cada par de superfícies: (a) e (b) par S1; (c) e (d) par S2 e (e) e (f) par S3.

Nas geometrias S1 e S3, pode-se notar valores elevados da densidade de fluxo nas extremidades das superfícies.

Em particular na geometria S2 esse efeito é minimizado, pois o entreferro é menor no centro do pólo do atuador, e conseqüentemente, a concentração do fluxo magnético ocorre na região central.

Como o objetivo do mapeamento é o estudo da influência da posição do sensor hall no cálculo da força, e não um estudo sobre o efeito de borda que ocorre nestas superfícies, será levada em consideração apenas uma região central do pólo do atuador contendo uma área

quadrada de 9mm x 9mm. Desta maneira, busca-se analisar a região onde a densidade de fluxo apresenta-se de maneira homogênea.

A Figura 5.26, mostra a distribuição da densidade de fluxo e a estimativa da força magnética utilizando esta mesma distribuição de densidade para uma região central do pólo do atuador. A superfície analisada é o par de superfícies S3 (circular-circular).

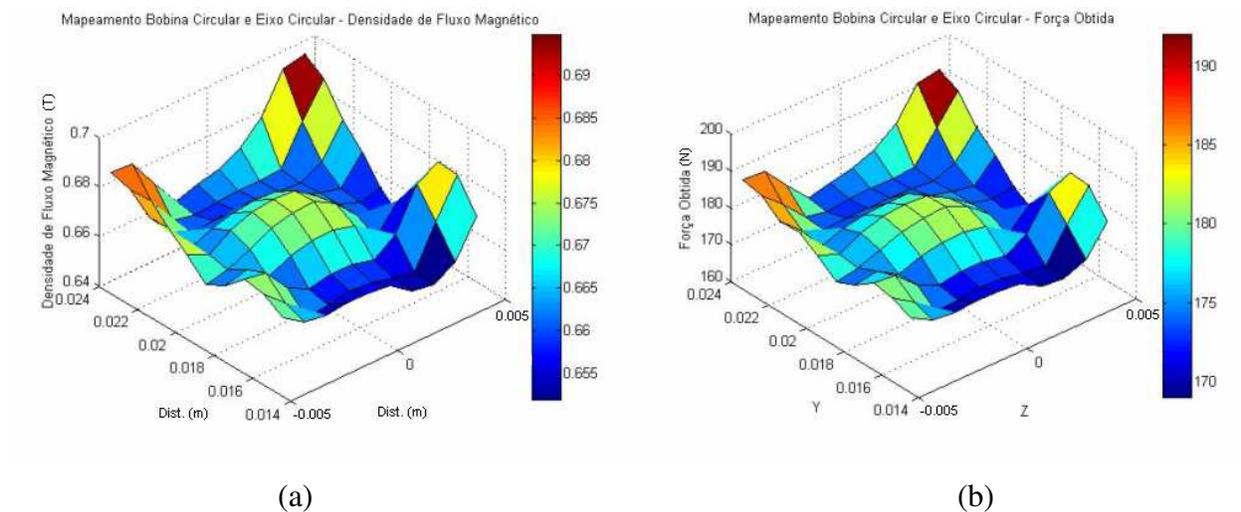


Figura 5.26– Mapeamento da densidade de fluxo magnético e força obtida, na região central do pólo do atuador, para o par de superfícies S3 (circular-circular).

Nota-se que, na região central, houve uma menor variação da densidade de fluxo magnético, o que não ocorre quando se caminha em direção às extremidades. Uma explicação para este fato é que, na região central, as linhas de fluxo tendem a apresentar um comportamento mais uniforme. Portanto, para a densidade de fluxo apresentada na Figura 5.26, o erro máximo na estimativa da força, utilizando o maior e o menor valor para o fluxo magnético, foi de aproximadamente 12%. Nesta ótica, sugere-se o posicionamento central do sensor hall no pólo do atuador.

Capítulo 6

Resultados Experimentais

Neste capítulo, são apresentados os dados experimentais obtidos, além de elucidar as técnicas empregadas para obtenção destes resultados. São mostrados também os equipamentos utilizados e uma breve descrição dos programas e procedimento experimental aplicado.

Confecção da Bobina

Como apresentado na seção 4. (solenóide) a bobina é uma parte importante do atuador magnético, pois fornece a força magneto motriz ($N.i$) que é utilizada para gerar o campo magnético e, conseqüentemente, a força magnética. Neste sentido, a confecção da bobina é um dos primeiros passos, mas não o menos importante, para o início da construção do atuador magnético. Entretanto, sendo o atuador magnético um sistema cujo projeto depende de restrições físicas, a construção da bobina ficará limitada ao espaço existente entre os braços do atuador. Desta forma, o emprego de um fio de pequeno diâmetro possibilitará um número maior de voltas, mas um valor menor de corrente elétrica. Já a utilização de um fio com diâmetro maior, permitirá um número menor de voltas, porém com o emprego de uma corrente elétrica maior. Maslen (2000) apresenta uma orientação sobre a construção de bobinas no que tange à escolha do diâmetro do fio, como segue:

As bobinas são criadas por anéis de fio seguindo um formato. Se um fio pequeno é utilizado, então um número maior de voltas caberá em 1 cm², enquanto que ,se um fio maior é utilizado, apenas um número pequeno de voltas caberá no mesmo espaço.

Isto mostra que a área total de cobre pela área da bobina é aproximadamente constante. Isto porque um fio pequeno tem um isolamento menor do que um fio maior. Como resultado, para uma dada área de bobina, a área de cobre será praticamente independente da quantidade de voltas. Para um enrolamento comercial, a razão entre a área de cobre e a área de bobina está entre 0,5 e 0,7.

O desempenho de um fio é limitado, termicamente, em termos da densidade de corrente que ele pode carregar: pequenos fios carregam pouca corrente e grande fios carregam grandes correntes. Geralmente, o valor limite é a cerca de 600A/cm².

Assim, para uma dada área de bobina, o valor máximo disponível para a força magneto motriz é fixo, não dependendo do tamanho do fio empregado:

Desta maneira, utilizando os dados fornecidos por Maslen, pode-se estimar o valor máximo da força magneto motriz, que pode ser obtida em um projeto de atuador, empregando a Equação 6.1 abaixo, sendo A_c a área disponível para construção da bobina em cm².

$$N \cdot i_{\max} \approx 600 \times 0,5 \cdot A_c = 300 \cdot A_c \quad (6.1)$$

Dentro deste contexto, foi utilizado um fio de cobre com 0,91mm de diâmetro. Este valor desconsidera a espessura de isolamento, pois se considerada, o diâmetro atinge o valor de 1,15mm.

Na tentativa de se obter um enrolamento com características comerciais confiáveis, desenvolveu-se uma máquina manual para enrolamento de bobinas, contendo manivela e contador de número de voltas, conforme Figura 6.1.

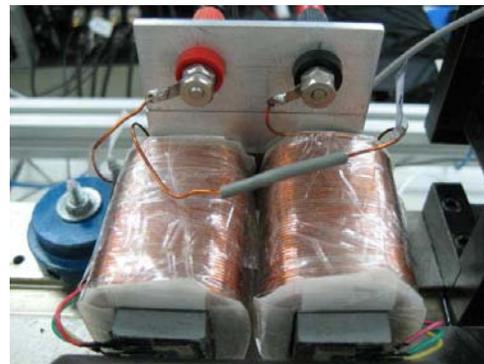


Figura 6.1 – Máquina manual para enrolamento de bobinas.

Os resultados obtidos com a utilização da máquina são evidentes e podem ser observados na Figura 6.2(a) que apresenta uma primeira bobina confeccionada manualmente sem o emprego da máquina, e a Figura 6.2(b) que mostra uma segunda bobina, montada a partir da máquina. Nota-se que, além de um controle mais rigoroso no número de voltas, obteve-se também uma distribuição mais uniforme do fio de cobre.



(a)



(b)

Figura 6.2 – (a) Bobina confeccionada sem a utilização da máquina de enrolamento; (b) bobina montada com o emprego da máquina de enrolamento.

Sensor de efeito Hall

O sensor de efeito hall, ou *hall sensor*, é um instrumento que permite a leitura direta da densidade de fluxo magnético que é utilizada no cálculo do campo magnético do atuador,

substituindo, assim, a maneira clássica de obtenção deste campo magnético, a qual emprega a leitura da corrente elétrica e dos sensores de deslocamento para estimativa do entreferro. Esta é uma das vantagens do emprego deste tipo de sensor, além, é claro, de se tratar de um sistema integrado, que permite uma grande possibilidade de ajustes.

Neste trabalho, foi utilizado o sensor hall da empresa Melexis código MLX90251, cujas características dimensionais são mostradas na Figura 6.3. Este é um sensor programável, com saída linear proporcional à densidade de fluxo magnético e à voltagem de alimentação, o qual também possui um processo ativo de correção de erro, normalmente associado a sensores analógicos de efeito hall. Todos os parâmetros deste sensor são programáveis: sensibilidade, coeficiente angular e linear, valores máximos e mínimos, sensibilidade térmica, além de filtros passa baixa. Para o caso de rastreamento, cada sensor apresenta um número de identificação único e disponibiliza uma memória de 24 bits para o usuário realizar seu próprio cadastramento.

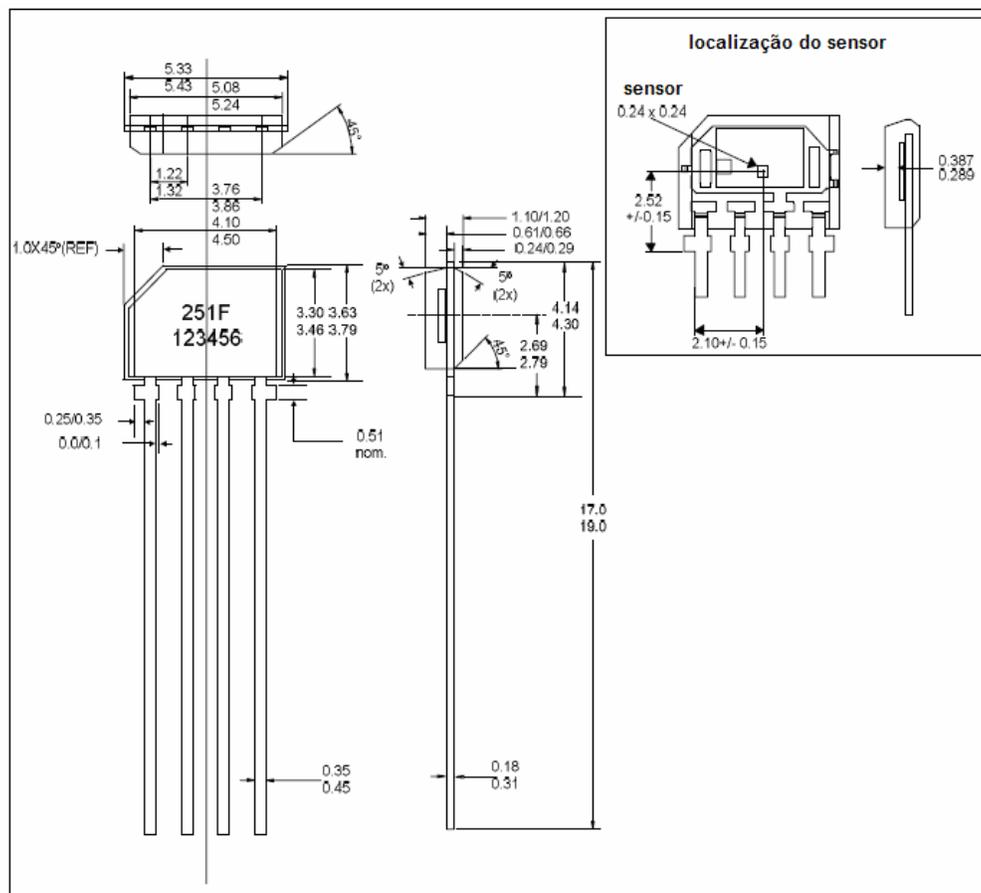


Figura 6.3 – Dimensões em milímetros do sensor hall.

Como o sensor hall fica posicionado no entreferro, ou seja, na região entre o atuador e a luva, este está sujeito a problemas de impacto mecânico que pode ocorrer em situações extremas, como falhas no sistema de controle, instabilidades dinâmicas, entre outras. Desta forma, foram confeccionados anéis de proteção, com o objetivo de resguardar o sensor no caso de falhas. A Figura 6.4 mostra o sensor hall e o anel de proteção confeccionado de bronze com espessura de 1.5mm. O campo magnético não é alterado pela presença do anel de proteção uma vez que, seu material, não é ferromagnético.

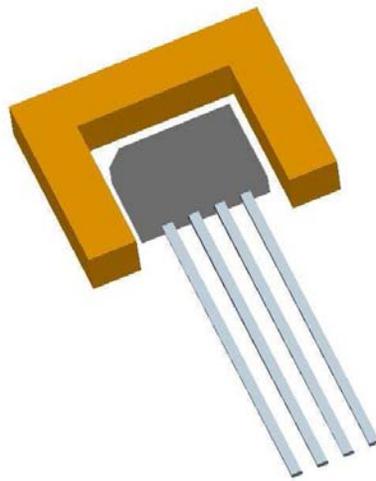


Figura 6.4 – Sensor hall e anel de proteção feito de cobre.

Controlador

Na seção 5 (parâmetros da bobina), foi apresentada a resposta simulada do atuador, operando em duas situações: com e sem o controlador de densidade de fluxo. Foi possível observar que o emprego do controlador proporcional aumentou o desempenho do atuador, no que se refere à frequência de corte, traduzindo-se, assim, no aumento da frequência de operação do atuador.

Em uma análise semelhante, Marszolek (2006), mostra que, para uma comparação entre as principais técnicas de controle (P, PD e PID), a resposta obtida para o controle da força de

excitação é semelhante. Assim, o emprego de um controlador proporcional torna-se uma solução viável, por se tratar de um sistema simples e de fácil fabricação.

Para testar o desempenho deste tipo de controlador, inicialmente foi utilizado o software LabVIEW para implementação do controle. Porém, notou-se certa limitação na resposta do controlador, devido à restrição da placa com relação à frequência máxima de amostragem. Quanto maior a frequência de amostragem utilizada, melhor foi a resposta obtida, entretanto, maior foi a sobrecarga na placa de aquisição, que também era responsável pela geração e aquisição dos sinais. Para resolver este problema, foi montado um controlador proporcional analógico, cujo diagrama é mostrado na Figura 6.5.

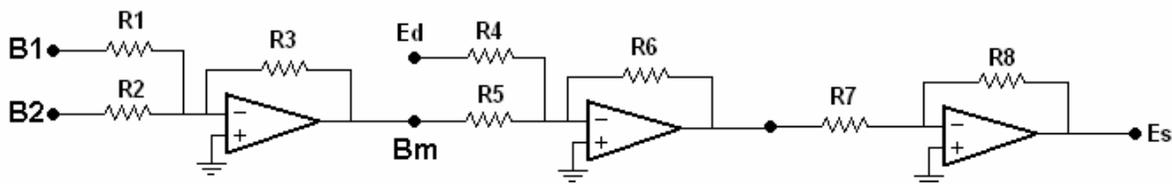


Figura 6.5 – Diagrama do controlador proporcional empregado.

Os resistores R_1 e R_2 têm o dobro da resistência do resistor R_3 . Este procedimento foi empregado para realizar a soma analógica dos sinais dos sensores hall, indicada por B_m . Já os demais resistores apresentam o mesmo valor de R_3 . Para o esquema mostrado, R_1 e R_2 têm o valor de $20\text{k}\Omega$, enquanto os resistores R_3 , R_4 , R_5 , R_6 , e R_7 utilizados foram de $10\text{k}\Omega$. O ganho do controlador é dado pelo ajuste do resistor R_8 . Os valores da densidade de fluxo magnético para os pólos 1 e 2 são representados por B_1 e B_2 , respectivamente. O valor do sinal desejado é representado por E_d , já a saída do controlador é identificada por E_s .

Foram utilizados amplificadores operacionais da marca *ST*, modelo TL074CN. A Figura 6.6 mostra o circuito analógico do controlador e o circuito montado com capacitores necessário para a utilização dos sensores hall. Maiores explicações sobre a montagem do circuito utilizado para alimentar os sensores hall, podem ser encontradas em Melexis,2005.

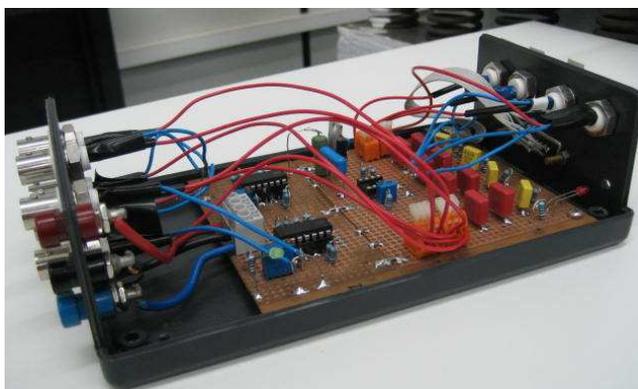


Figura 6.6 – Controlador analógico e circuito para alimentação dos sensores hall.

Programa de geração e aquisição de dados

Toda a geração dos sinais de excitação e aquisição de dados foram realizados utilizando-se o software LabVIEW, da empresa National Instruments. Para realizar esta tarefa, foi utilizada uma placa de aquisição PCI Express (Ni 6259) com 32 canais de entrada e 4 canais de saída, todos analógicos. Esta placa tem uma frequência de amostragem máxima de 1 MHz, valores de entrada ajustáveis nas faixas de $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 2V$, $\pm 1V$, $\pm 0.5V$, $\pm 0.2V$ e $\pm 0.1V$ e valores de saída ajustáveis nas faixas de $\pm 10V$ e $\pm 5V$, todas as faixas com resolução de 16 bits.

A flexibilidade na utilização do software LabVIEW foi importante no desenvolvimento do programa de geração de sinais, pois, como discutido no capítulo 4, uma maneira de se realizar a linearização da força é operar o sistema utilizando a configuração diferencial e, para isto, é necessário gerar um sinal com nível DC (polarização) e, sobre este, o sinal AC (sinal de excitação). A Figura 6.7 mostra uma visão geral do programa, na qual é possível notar três regiões importantes: na primeira, é realizado o ajuste dos canais com as curvas de calibração e sincronização entre a geração e a aquisição do sinal; na segunda parte, o programa entra num ciclo de repetição para que sejam adquiridas as quantidades de médias previamente fornecidas; finalmente, na terceira e última etapa, realiza-se a gravação dos resultados e a liberação dos canais.

Bancada experimental

Após o estudo dos modelos de alguns dos componentes, e a montagem do programa de geração de sinais e aquisição de dados, utilizou-se a bancada apresentada na Figura 6.8 para análise do desempenho do atuador. Esta bancada é composta basicamente por: uma mesa inercial, uma base formada por uma placa de aço, que pode ser fixada em apoios rígidos ou flexíveis para estudo da influência da fundação, um motor de 2200 W, acoplado a um inversor de frequência, utilizado para controlar a rotação do motor, mancais hidrodinâmicos instrumentados, cujos componentes são apresentados na Figura 6.10, eixo, rotor, atuador magnético, além de sensores de deslocamento, acelerômetros e transdutores de força.

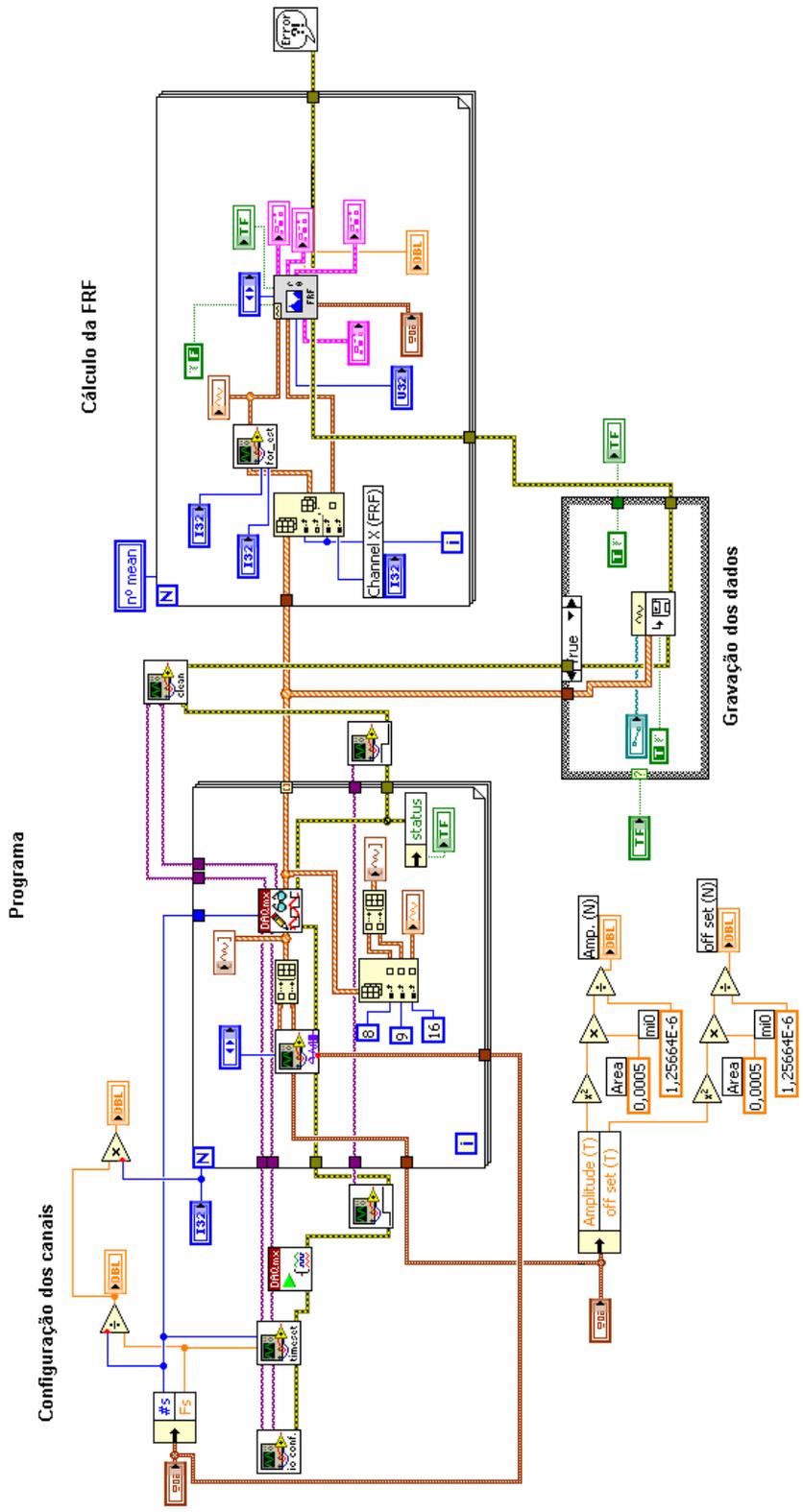


Figura 6.7 – Programa de geração de sinais e aquisição de dados.



Figura 6.8 – Bancada experimental.

As dimensões do rotor utilizado no teste experimental são apresentadas na Figura 6.9, em milímetros. Observe que são as mesmas medidas utilizadas no modelo em elementos finitos. Nesta montagem, o atuador magnético foi posicionado próximo ao mancal de número 2. Este o ponto onde é inserida a força magnética para excitação do rotor.

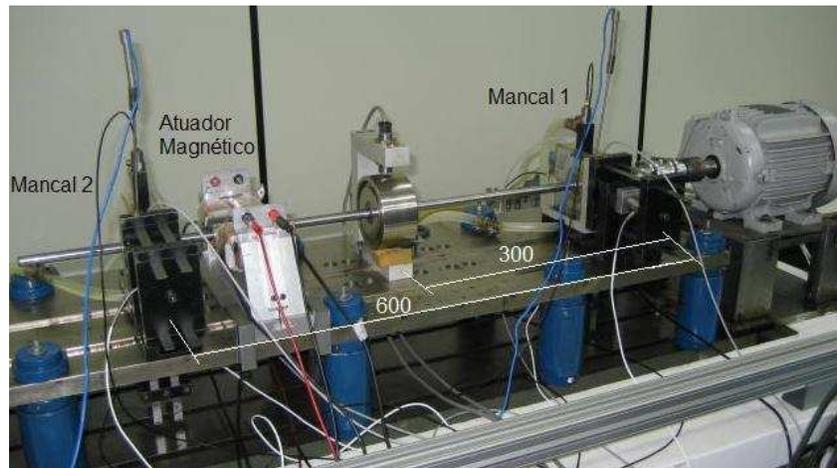


Figura 6.9 – Dimensões do rotor analisado.

Como dados medidos, além do fluxo magnético para cálculo da força magnética, também foram obtidos os deslocamentos na direção vertical e horizontal da massa do rotor, as forças nas mesmas direções em cada um dos mancais, os deslocamentos no interior do mancal, além das

acelerações. A Figura 6.10 apresenta uma ilustração da montagem da caixa do mancal hidrodinâmico, seus componentes e instrumentação. Observa-se que os sensores de deslocamento no interior do mancal, sensores de proximidade, estão rotacionados em 45° em relação ao plano XY.

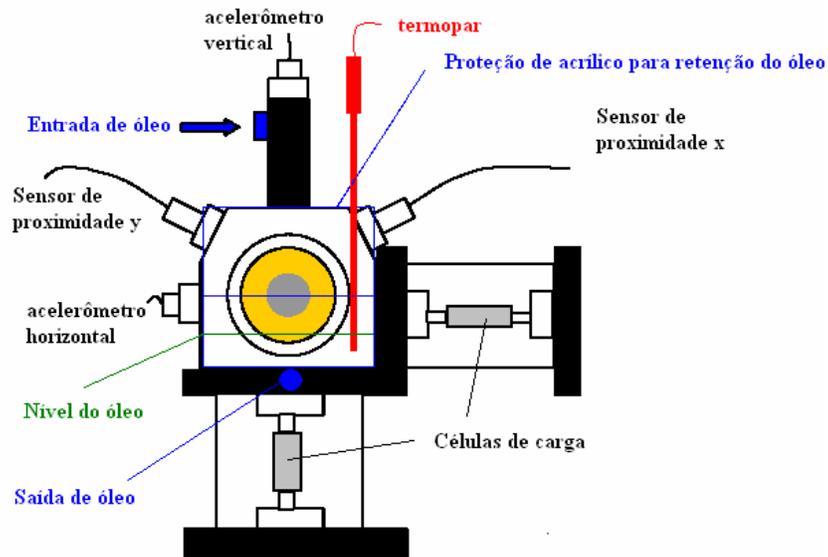


Figura 6.10 – Mancal hidrodinâmicos e seus componentes.

Um dos parâmetros importante no projeto do atuador é o valor da força máxima obtida pelo mesmo. Nesta ótica, o presente atuador foi desenvolvido tendo-se como base a Equação 4.17, que apresenta a força estática obtida pelo atuador, considerando seus parâmetros (dimensões do pólo e parâmetros da bobina) e considerando também parâmetros de projeto, como o valor do entreferro.

$$F = \frac{\mu_0 AN^2 i^2}{4g^2} \quad (4.17)$$

A área do pólo do atuador é de 500mm², o número de espiras na bobina é de 830 e a corrente máxima utilizada foi de 3A. Substituindo esses valores na Equação 4.17, para um valor de entreferro de 2.5mm, e considerando μ_0 o coeficiente de permeabilidade do ar ($\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ henry/metro), obtém-se o valor aproximado de 155 N para a força. Este valor de força é maior do que o necessário para excitar a estrutura, pois em testes experimentais prévios, empregando-se o excitador eletromecânico (shaker), o valor de força máxima necessária foi de cerca de 30N. Nota-se que o atuador apresenta força maior do que a necessária para excitar o sistema, esta

característica é proposital pois, embora neste trabalho ele esteja sendo utilizado apenas como excitador, em trabalhos futuros pretende-se utilizá-lo como ferramenta para controle de vibração e, neste caso, as forças envolvidas são maiores. A Figura 6.11 mostra as dimensões, em milímetros, da placa utilizada para montar o núcleo do atuador.

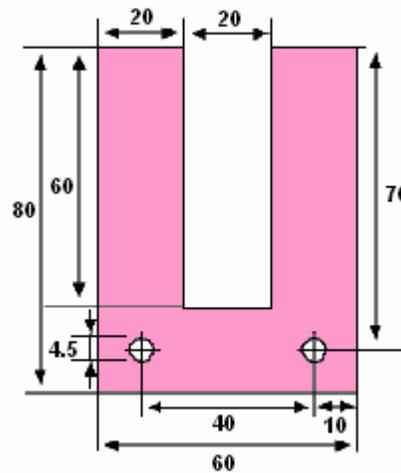
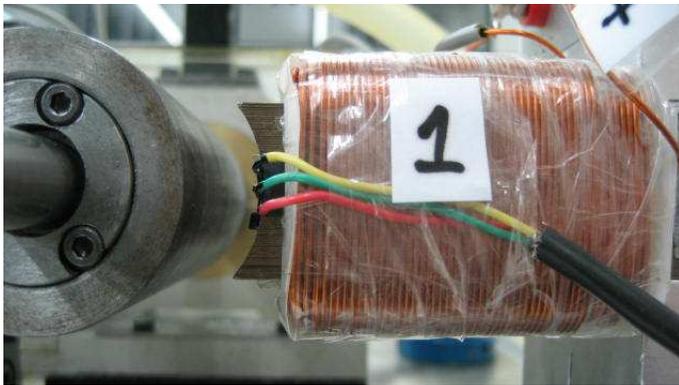


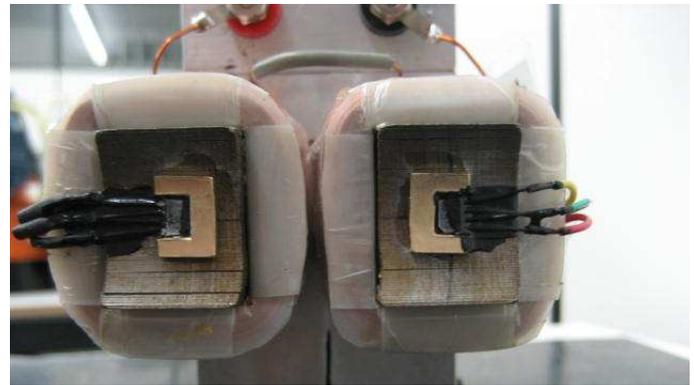
Figura 6.11 – Dimensões em milímetros da placa utilizada para montar o núcleo do atuador.

A placa mostrada acima é feita de aço-silício e atinge a saturação quando o campo magnético está entre 1.7 e 2 T (tesla), (Chiba et al. 2006a). Para minimizar problemas devido a corrente parasita (*eddy current*) foram utilizadas várias placas sobrepostas num total de 25 placas. Assim, obteve-se uma altura de 25mm e uma largura de 20mm para cada pólo do atuador, obtendo-se a área de 500mm^2 .

Com relação ao perfil do pólo do atuador, utilizou-se o perfil semi-circular, tendo como base o estudo realizado pelo método de elementos finitos apresentado no capítulo 5 (influência do perfil do pólo no cálculo da força magnética). Este perfil e o posicionamento dos sensores hall são mostrados na Figura 6.12. Observa-se que, para manter o entreferro constante, o perfil apresentado só pode ser utilizado para um único diâmetro da luva.



(a)



(b)

Figura 6.12 – (a) Entreferro e perfil de pólo utilizado; (b) posicionamento dos sensores hall.

Como o objetivo principal do trabalho foi o de utilizar o atuador magnético como fonte de excitação externa e, sendo o atuador magnético capaz de gerar apenas força de atração quando empregado em materiais magnéticos, não pré-magnetizados, utilizou-se a montagem diferencial como mostrada no capítulo 4 (montagem diferencial) para geração das forças nas duas direções do eixo X, que está no plano horizontal do rotor. Com esta montagem, foi possível reproduzir as excitações criadas pelo programa de geração de sinais e aquisição de dados, que trabalha com excitações senoidais e aleatórias. A Figura 6.13 mostra esta montagem na bancada.

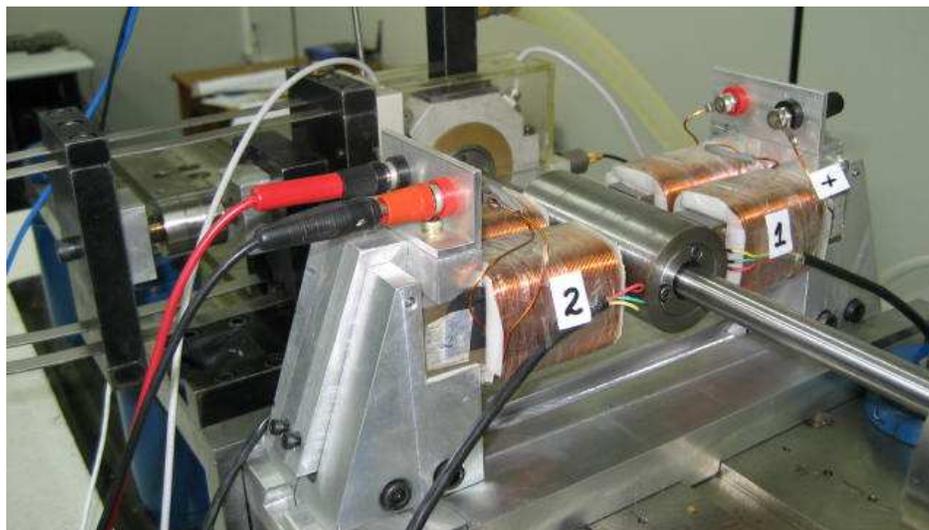


Figura 6.13 – Montagem diferencial do atuador na bancada experimental.

Resultados experimentais

Análise sem o controlador

Um dos objetivos a ser alcançado no desenvolvimento do atuador é a obtenção de uma força que possa ser controlada e, conseqüentemente, utilizada para diferentes aplicações, tais como: controle nas amplitudes de vibração, excitação externa sem contato, etc. Neste sentido, com a finalidade de avaliar experimentalmente o desempenho do atuador, analisou-se a força obtida, aplicando-se uma excitação senoidal com frequências de 5, 15, 30 e 40Hz, a partir da montagem diferencial mostrada na Figura 6.13, com o emprego da corrente de polarização.

Também foi analisada a influência do controlador no desempenho do atuador. Para isto, utilizando-se os sensores hall e as células de carga, foram obtidas as forças diretamente nos mancais (por meio das células de carga) e, simultaneamente, a força magnética estimada utilizando-se os sensores hall em conjunto com a Equação 4.16.

As Figuras 6.14 e 6.15 mostram tanto as forças nos mancais 1 e 2 na direção horizontal (identificadas como F_1X e F_2X), como a força magnética inserida na mesma direção com rotor parado (identificada como F). Esses resultados foram obtidos sem o emprego do controlador de densidade de fluxo. Neste teste, a amplitude da força desejada foi de 30N e as frequências de excitação foram de 30 e 40Hz, respectivamente.

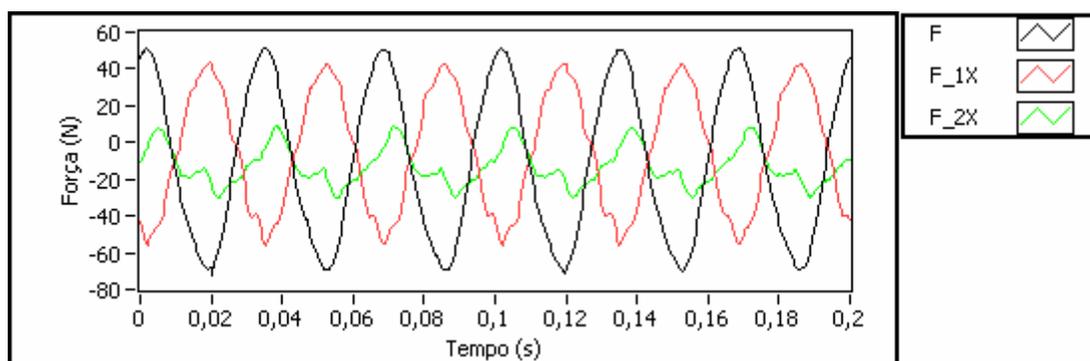


Figura 6.14 – Força magnética inserida no rotor parado e forças obtidas nos mancais 1 e 2 para uma excitação senoidal de 30Hz, sem o emprego do controlador.

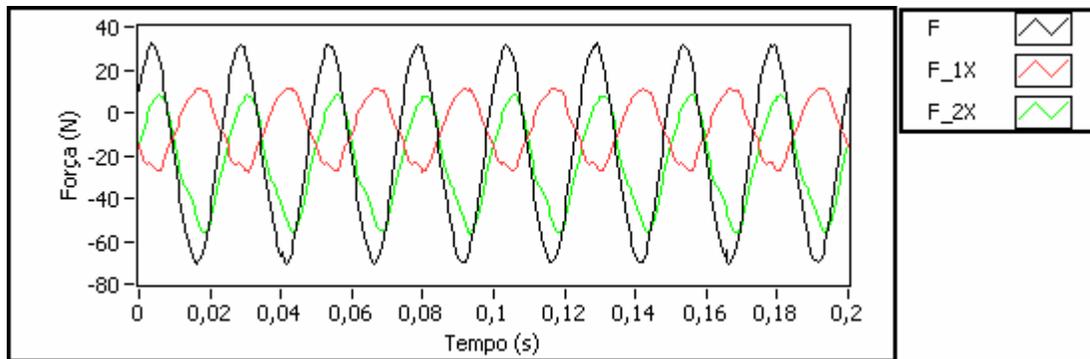


Figura 6.15 – Força magnética inserida no rotor parado e forças obtidas nos mancais 1 e 2 para uma excitação senoidal de 40Hz, sem o emprego do controlador.

Observa-se que, em nenhum dos casos, foi possível obter a força senoidal com a amplitude desejada. Em ambos os casos, os dois atuadores não exercem força de maneira semelhante, pois é possível notar uma maior magnitude de força de compressão do que de tração, ou ainda, o rotor não está sendo excitado simetricamente em relação a sua posição original.

Devido à falta de controle na força de excitação, não foi possível realizar testes com valores mais baixos de frequência de excitação, pelo fato de ocorrerem impactos entre a luva e o pólo do atuador, o que poderia levar a quebra dos sensores hall.

A falta de controle na força de excitação também é evidente quando se verifica o valor do fluxo magnético obtido em cada um dos sensores hall. As Figuras 6.16 e 6.17 mostram o valor da densidade de fluxo magnético obtida nos sensores hall instalados nos pólos dos atuadores. Os sensores identificados por B1 e B2 estão posicionados no pólo 1 e 2 do atuador 1. Já os sensores identificados por B3 e B4, estão posicionados no pólo 1 e 2 do atuador 2. A densidade de fluxo magnético média obtida no atuador 1 é identificada por B1_B2, já o valor da densidade de fluxo magnético média obtida no atuador 2 é identificada por B3_B4.

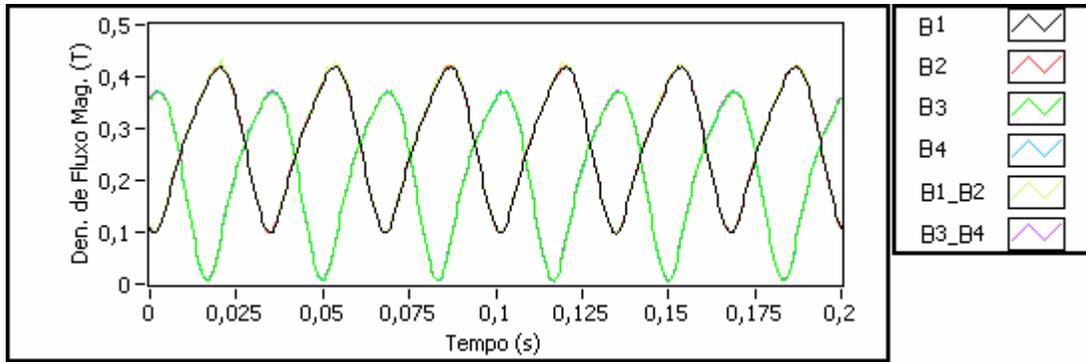


Figura 6.16 – Fluxo magnético obtido nos sensores hall, para uma excitação senoidal de 30Hz, sem o emprego do controlador.

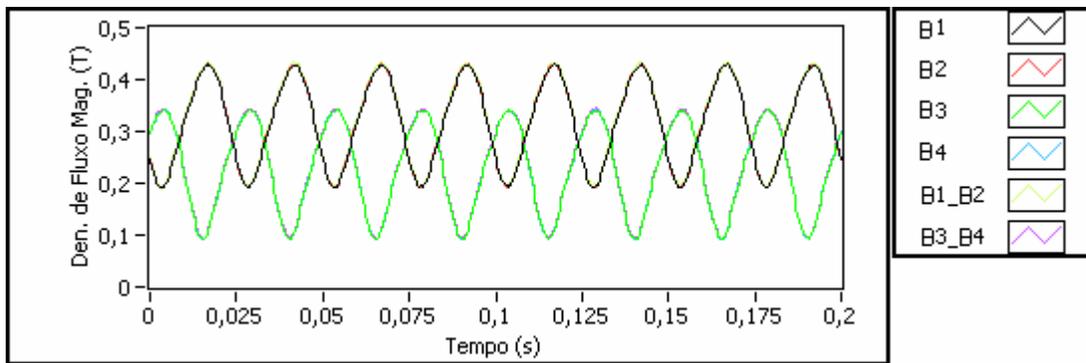


Figura 6.17 – Fluxo magnético obtido nos sensores hall, para uma excitação senoidal de 40Hz, sem o emprego do controlador.

Também foi possível monitorar a corrente fornecida pelos amplificadores para cada um dos atuadores. A corrente utilizada no atuador 1 é identificada como Curr_1, já a corrente empregada no atuador 2 é representada por Curr_2. Em ambos os casos, é possível observar a diferença entre os valores da corrente aplicada em cada um dos atuadores.

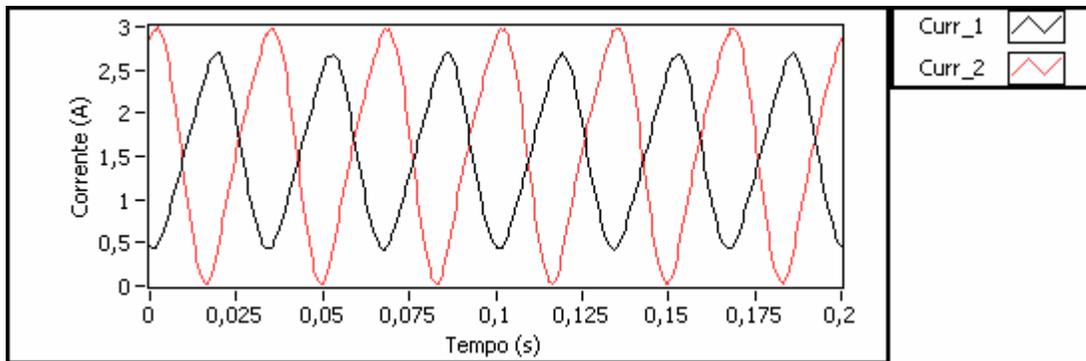


Figura 6.18 – Corrente elétrica aplicada nos atuadores 1 (Curr_1) e 2 (Curr_2), para uma excitação senoidal de 30Hz, sem o emprego do controlador.

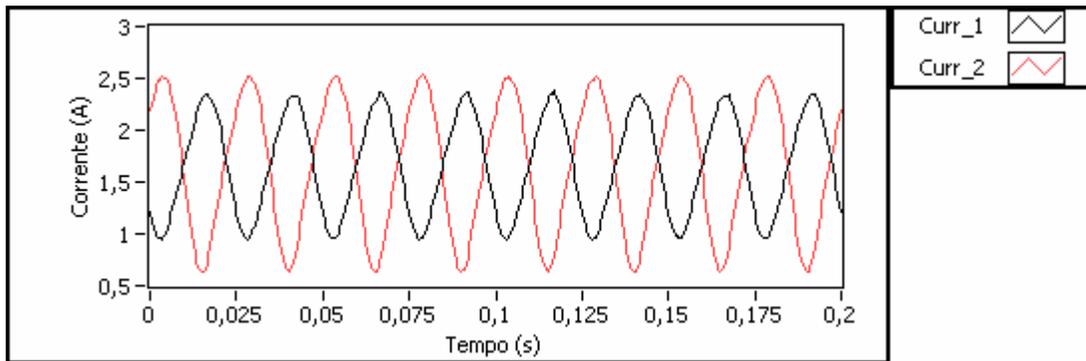


Figura 6.19 – Corrente elétrica aplicada nos atuadores 1 (Curr_1) e 2 (Curr_2), para uma excitação senoidal de 40Hz, sem o emprego do controlador.

Emprego do controlador

Empregando-se o controlador de densidade de fluxo, é possível obter certo controle sobre a força gerada. Este resultado é evidenciado nas Figuras 6.20, 6.21, 6.22 e 6.23. Nestes testes, obteve-se a amplitude de 30N no valor da força, com as excitações senoidais de 5, 15, 30 e 40 Hz. Utilizando-se o controlador, foi possível obter respostas para frequências de excitação abaixo de 30Hz, pois, neste caso, não ocorreu impacto entre a luva e o pólo do atuador.

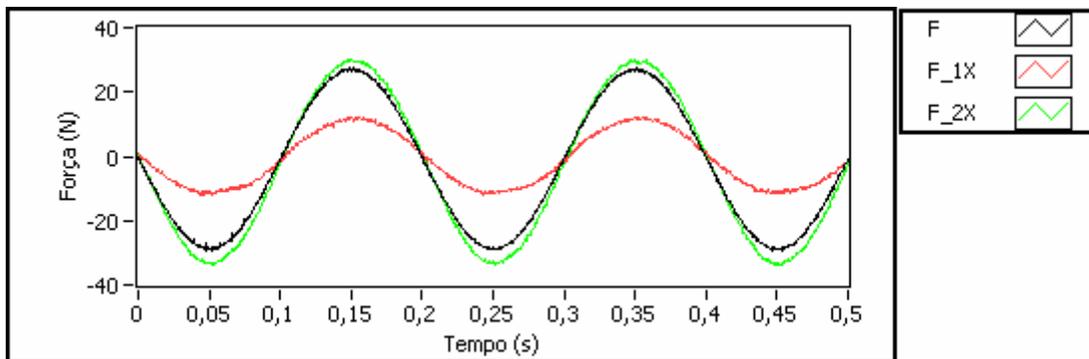


Figura 6.20 – Força magnética inserida no rotor parado e forças obtidas nos mancais 1 e 2 para uma excitação senoidal de 5Hz, com o emprego do controlador.

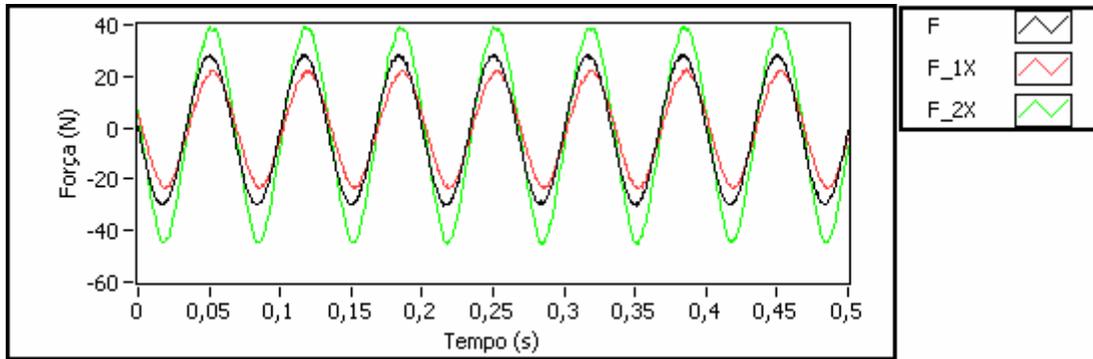


Figura 6.21 – Força magnética inserida no rotor parado e forças obtidas nos mancais 1 e 2 para uma excitação senoidal de 15Hz, com o emprego do controlador.

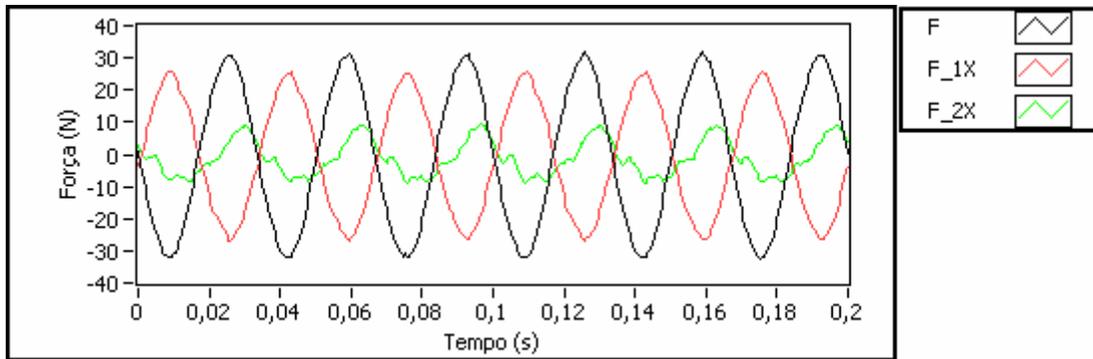


Figura 6.22 – Força magnética inserida no rotor parado e forças obtidas nos mancais 1 e 2 para uma excitação senoidal de 30Hz, com o emprego do controlador.

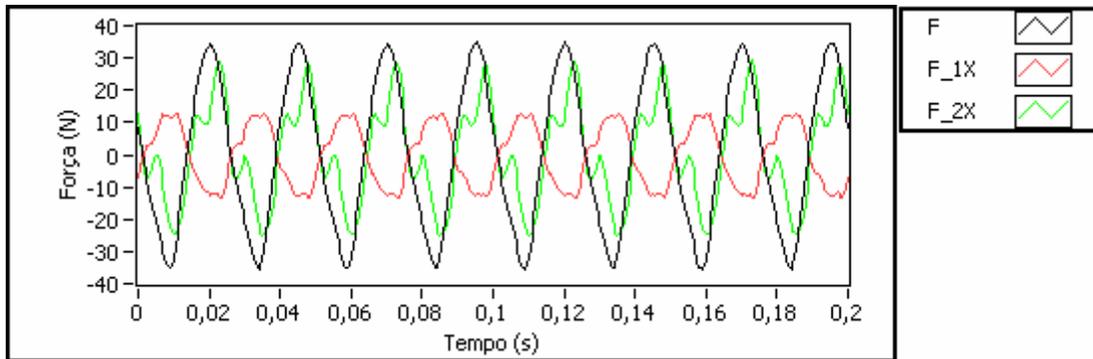


Figura 6.23 – Força magnética inserida no rotor parado e forças obtidas nos mancais 1 e 2 para uma excitação senoidal de 40Hz, com o emprego do controlador.

Com o emprego do controlador, em todos os casos foi possível obter a força desejada próxima a 30N, além da grande contribuição de permitir a excitação do sistema para maior faixa

de frequências, sem danificar os pólos do atuador. Os impactos do atuador com a luva ocorriam devido à característica de rigidez negativa do atuador, pois quanto menor o entreferro, maior é a força magnética. Empregando-se o controlador, o próprio sistema se encarrega de diminuir a corrente em função da densidade de fluxo magnético existente. Sendo a densidade de fluxo magnético diretamente proporcional à corrente, e inversamente proporcional ao entreferro, para se manter um valor predeterminado de densidade, uma ação de diminuição do entreferro deve gerar, como reação, um decréscimo da corrente aplicada e vice-versa.

Outra importante característica observada nas respostas acima, é a relativa simetria entre as forças geradas em cada um dos atuadores. Observa-se que, tanto a força máxima de tração, quanto a força máxima de compressão, tiveram valores semelhantes em módulo, 30N, o que indica que o rotor foi excitado simetricamente em relação à sua posição original. Para se obter esta amplitude de força, o fluxo magnético gerado foi de aproximadamente 0.27T (tesla).

O valor da força de excitação nada mais é do que a resultante da força obtida em cada um dos atuadores. Observando as Figuras 6.24, 6.25, 6.26 e 6.27, notam-se os valores das densidades de fluxos magnéticos obtidas em cada um dos pólos dos atuadores (B1, B2, B3 e B4) e a média em cada um dos atuadores (B1_B2 e B3_B4), para o mesmo tipo de excitação apresentada acima. Estes valores também apresentam um comportamento simétrico com os atuadores trabalhando de forma defasada em 180°.

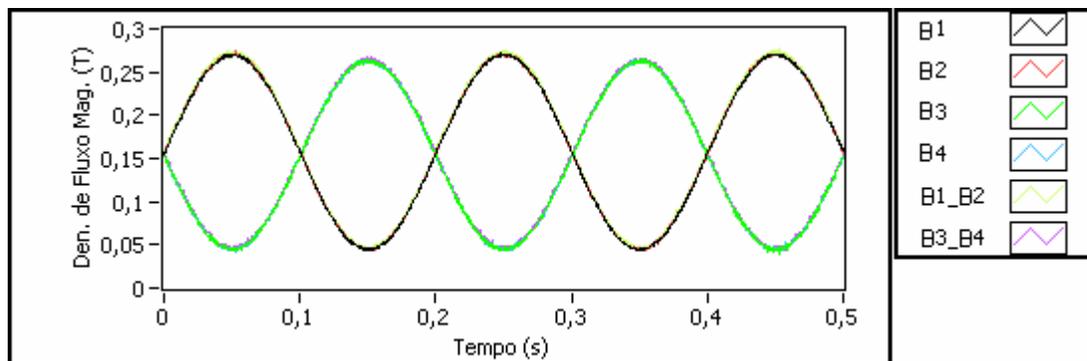


Figura 6.24 – Fluxo magnético obtido nos sensores hall, para uma excitação senoidal de 5Hz, com o emprego do controlador.

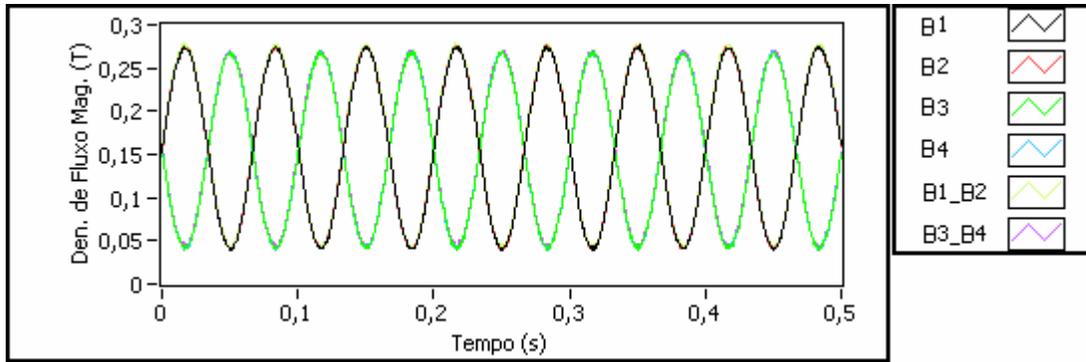


Figura 6.25 – Fluxo magnético obtido nos sensores hall, para uma excitação senoidal de 15Hz, com o emprego do controlador.

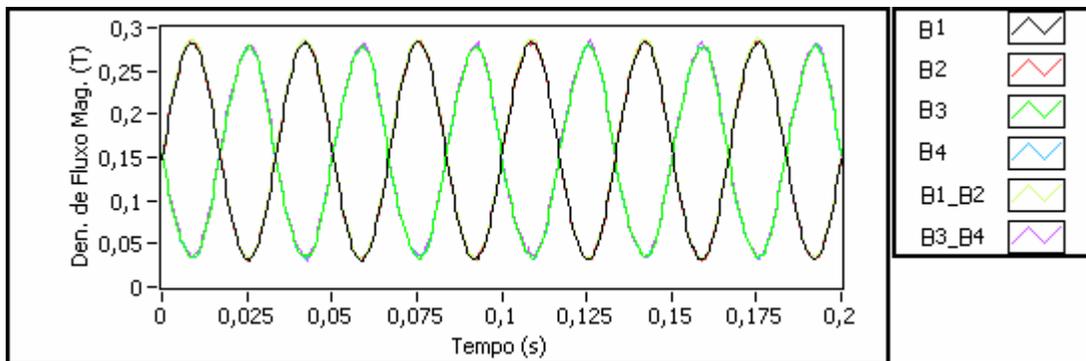


Figura 6.26 – Fluxo magnético obtido nos sensores hall, para uma excitação senoidal de 30Hz, com o emprego do controlador.

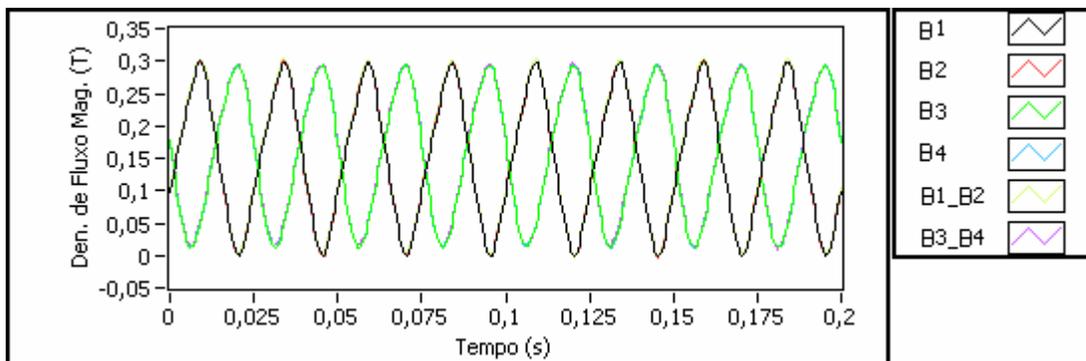


Figura 6.27 – Fluxo magnético obtido nos sensores hall, para uma excitação senoidal de 40Hz, com o emprego do controlador.

Como no caso anterior, nestes testes também foi possível monitorar a corrente fornecida pelos amplificadores para cada um dos atuadores. Nestes resultados, é importante notar o

comportamento das duas correntes. Embora as correntes também atuem defasadas de 180° entre si, as amplitudes são diferentes.

Em todos os casos, a corrente fornecida ao atuador 2 foi sempre maior do que a corrente utilizada no atuador 1. Isto se deve ao fato do fluxo magnético ser uma medida dependente da corrente e do entreferro e, possivelmente, o atuador 2 deve apresentar um entreferro ligeiramente maior do que o entreferro do atuador 1, em decorrência da própria montagem do sistema. Desta forma, ficou a cargo do controlador ajustar os valores de corrente para que o mesmo fluxo magnético pudesse ser obtido em ambos atuadores.

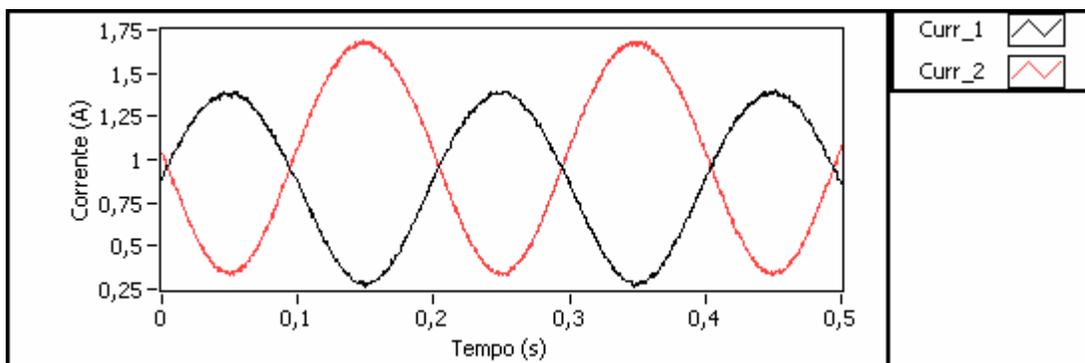


Figura 6.28 – Corrente elétrica aplicada nos atuadores 1 (Curr_1) e 2 (Curr_2), para uma excitação senoidal de 5Hz, com o emprego do controlador.

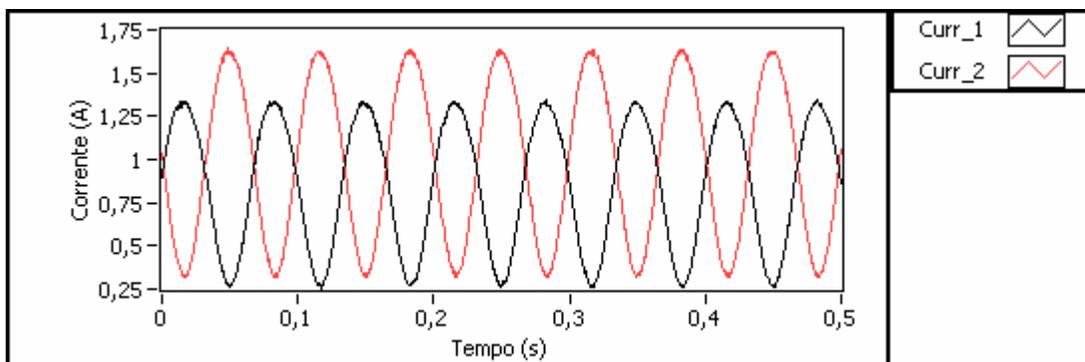


Figura 6.29 – Corrente elétrica aplicada nos atuadores 1 (Curr_1) e 2 (Curr_2), para uma excitação senoidal de 15Hz, com o emprego do controlador.

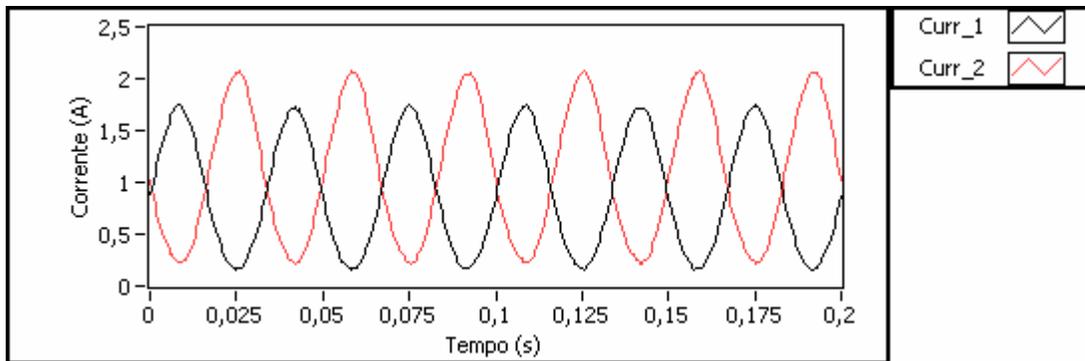


Figura 6.30 – Corrente elétrica aplicada nos atuadores 1 (Curr_1) e 2 (Curr_2), para uma excitação senoidal de 30Hz, com o emprego do controlador.

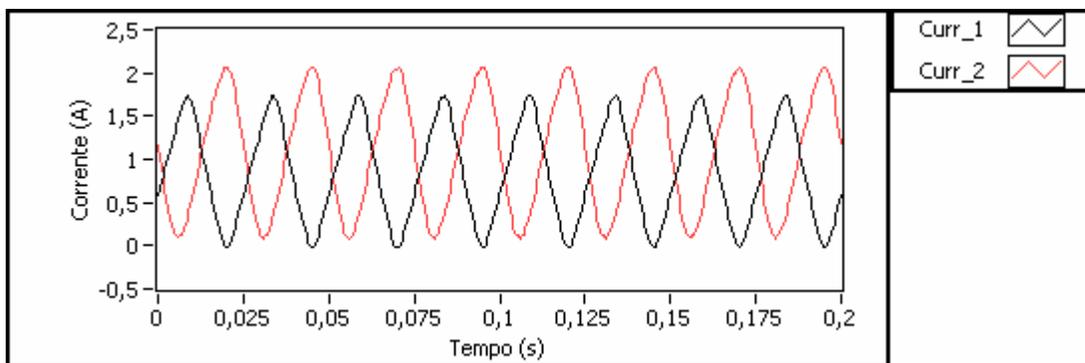


Figura 6.31 – Corrente elétrica aplicada nos atuadores 1 (Curr_1) e 2 (Curr_2), para uma excitação senoidal de 40Hz, com o emprego do controlador.

Função de transferência

Os resultados acima mostram uma análise sobre o controle da força gerada pelo atuador diante das excitações senoidais. Entretanto, em todos os resultados, o rotor está em repouso. Como o principal objetivo do trabalho é realizar esta excitação sem contato durante a operação o rotor, um dos testes realizados foi a obtenção da função de transferência entre a força magnética aplicada e os acelerômetros localizados nos mancais, deslocamento da massa, deslocamentos do eixo dentro do mancal e as forças nos mancais. Essas funções foram obtidas com o rotor parado e em operação.

A Figura 6.32 apresenta o rotor com o local de aplicação da força magnética (*driving point*) e os pontos onde foram obtidas as funções de transferência. Para obtenção das funções de transferência, foram feitas medições na massa concentrada (disco rígido) e nos mancais.

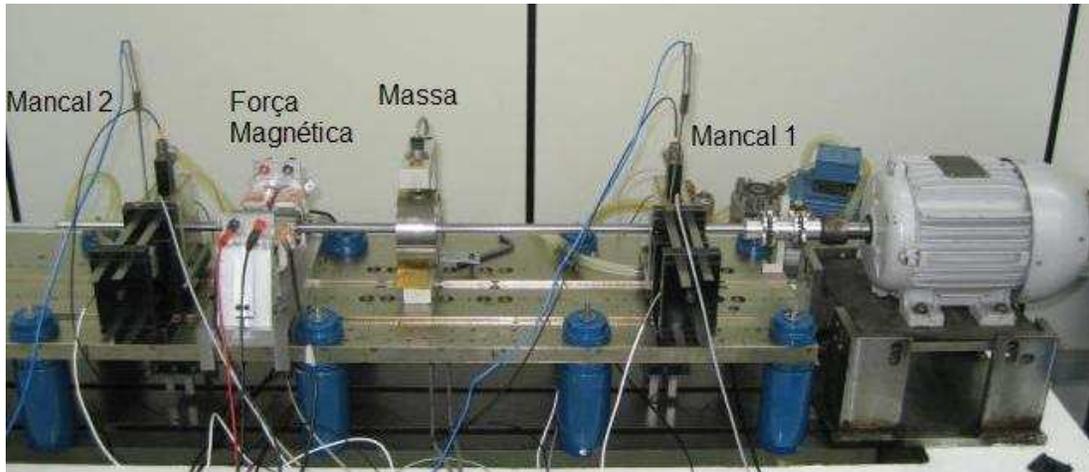


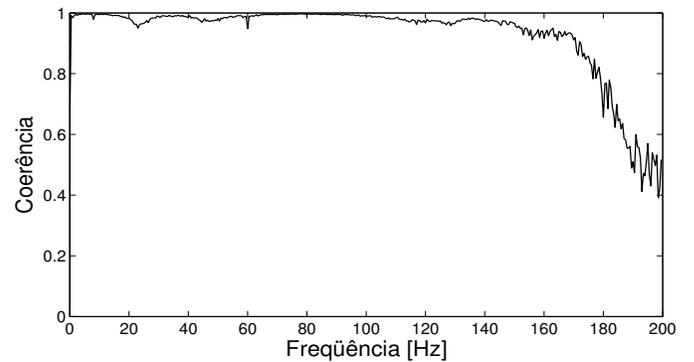
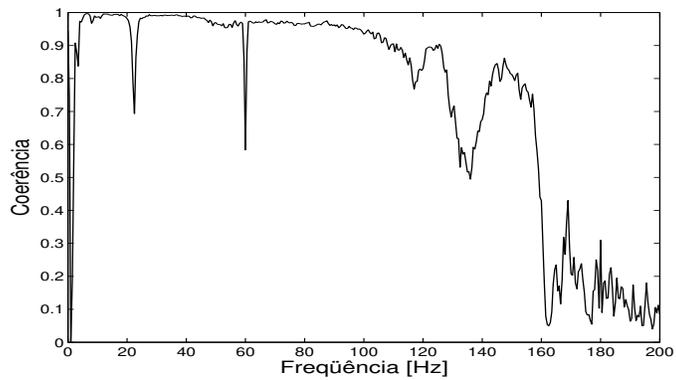
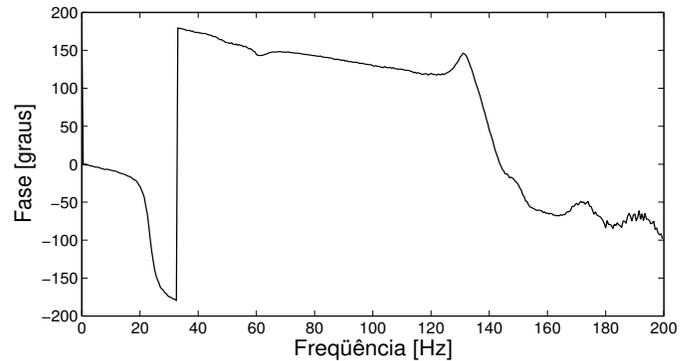
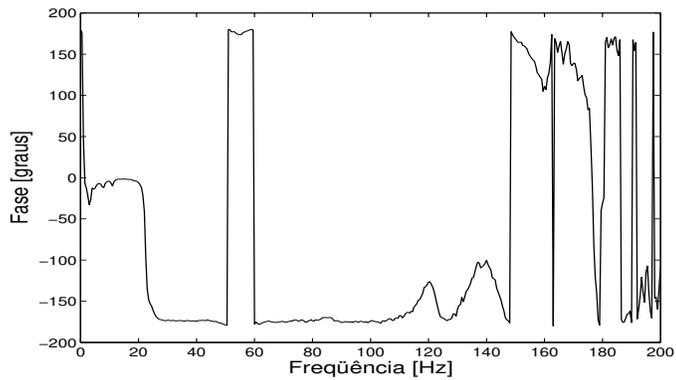
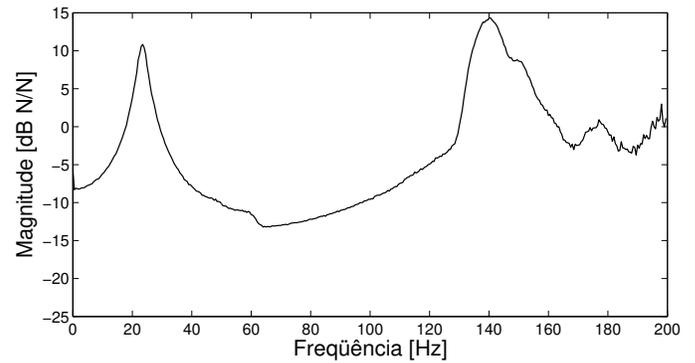
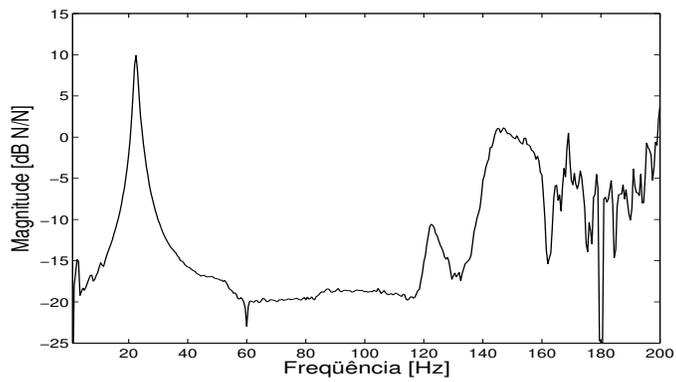
Figura 6.32 – Ponto de aplicação da força magnética (F_{mag}) e pontos de medição para obtenção das funções de transferência, mancais 1 e 2 e deslocamento horizontal da massa.

Para efeito de análise e comparação entre os resultados, também são apresentados os resultados obtidos por Okabe (2007). Em seu trabalho, Okabe utilizou a análise modal complexa para levantamento das funções de transferência do rotor e análise dos modos de vibração. Utilizando esta técnica, o pesquisador separou os modos de precessão direta e retrógrada, além de realizar um extenso trabalho sobre a identificação de parâmetros lineares e não lineares na interação rotor-estrutura. Neste contexto, Okabe utilizou a técnica convencional de excitação empregando-se o *shaker* e um mancal de rolamento para conectar o *shaker* ao eixo através da haste flexível (*stinger*). Dentre as medidas realizadas pelo pesquisador, apenas são apresentadas aquelas cuja excitação com o *shaker* foi inserida no mesmo ponto onde é inserida a excitação com o atuador magnético.

O pesquisador conseguiu realizar a identificação dos parâmetros dinâmicos, mas aponta para problemas existentes durante o processo de excitação, devido ao contato entre o rolamento e o eixo em rotação. Tais contatos geram forças tangenciais que provocam excitações no eixo em direções não desejadas.

A técnica empregada por Okabe, foi uma melhoria da técnica empregada por Tapia (2003). Tapia utilizou a mesma técnica de excitação, porém com buchas de deslizamento no lugar de rolamentos. Em seu trabalho, Tapia também conseguiu obter resultados na identificação dos modelos dos acoplamentos estudados, utilizando modelos teóricos e medidas experimentais, entretanto, o pesquisador também relata as dificuldades na obtenção da função de transferência utilizando este recurso como excitação externa.

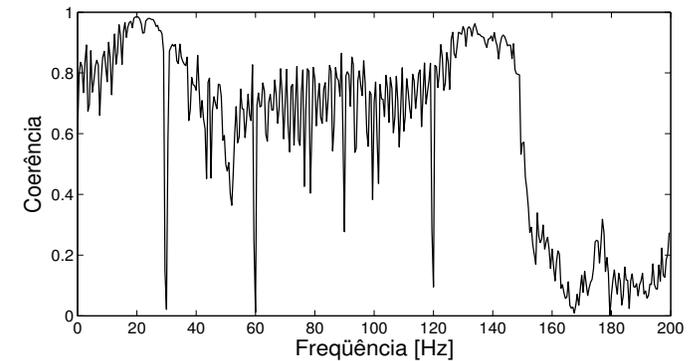
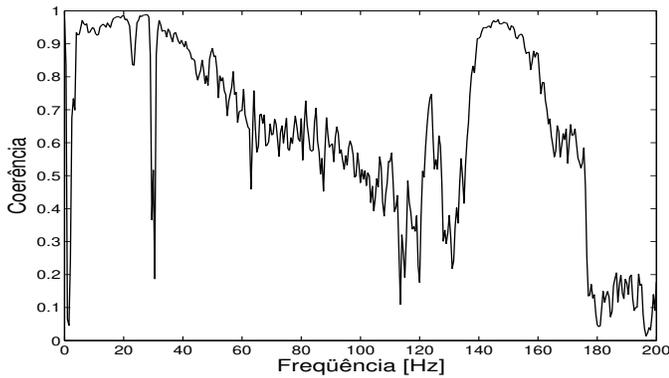
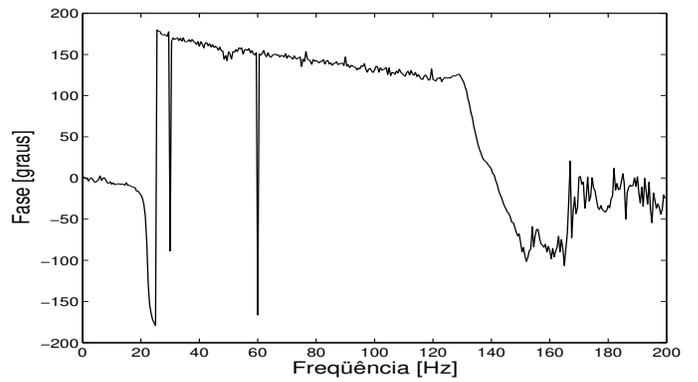
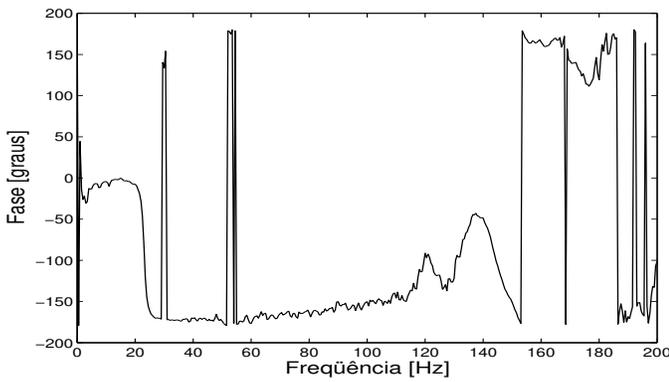
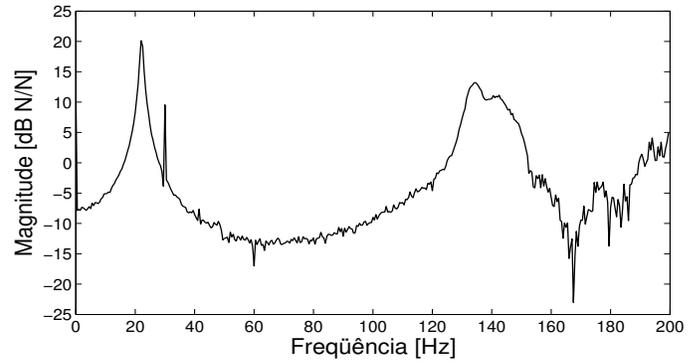
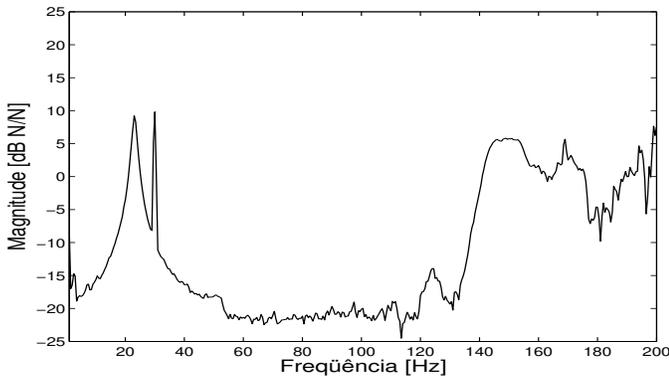
As Figuras 6.33, 6.34 e 6.35, mostram amplitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação mostrado na Figura 6.32 e a célula de carga localizada no mancal 1 na direção horizontal, para o rotor parado e girando, nas rotações de 30 e 40Hz, respectivamente. As respostas para a excitação realizada utilizando o *shaker* são identificadas como as Figuras 6.33(a), 6.34(a) e 6.35(a), enquanto que as respostas para a excitação realizada utilizando o atuador magnético são identificadas como as Figuras 6.33(b), 6.34(b) e 6.35(b). Para estes casos e os demais, o sinal utilizado na excitação foi o ruído branco.



(a)

(b)

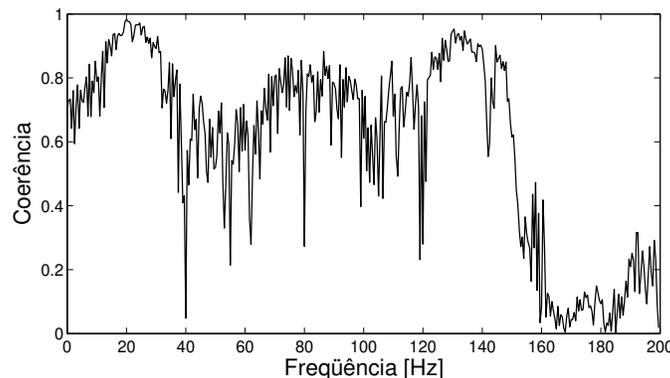
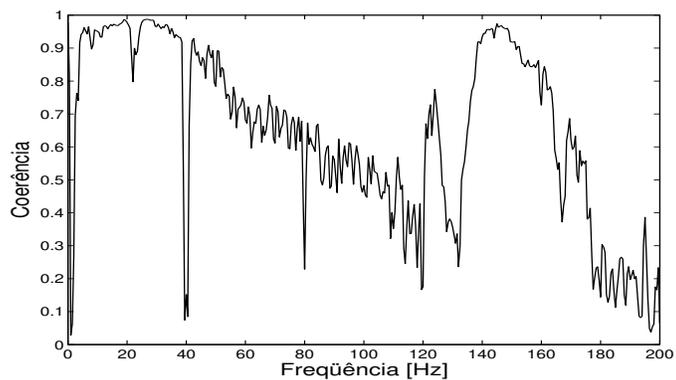
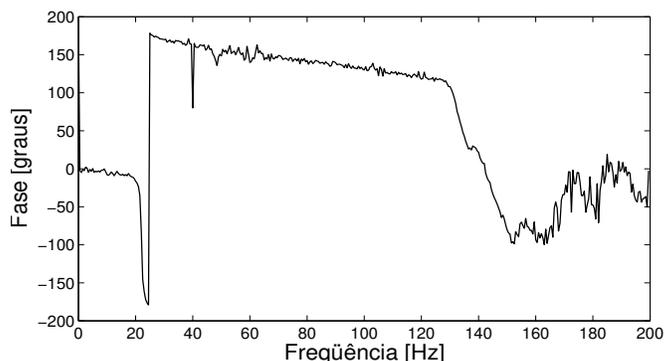
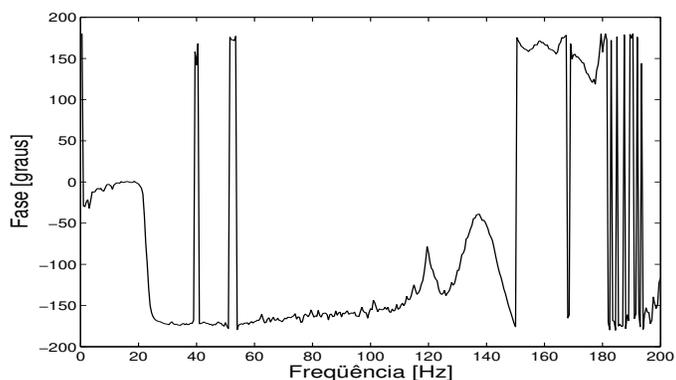
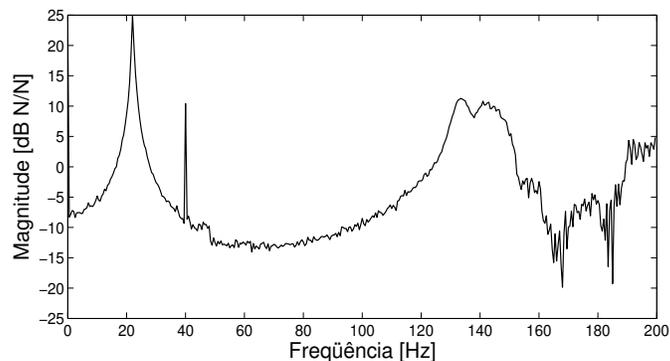
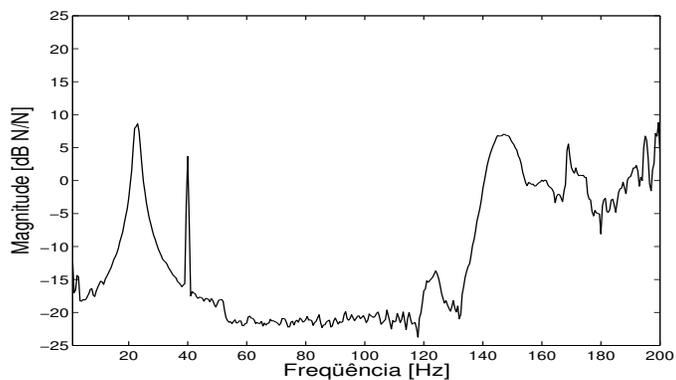
Figura 6.33 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e a força no mancal 1 na direção horizontal com o rotor parado, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.



(a)

(b)

Figura 6.34 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e a força no mancal 1 na direção horizontal com o rotor girando a 30 Hz, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.



(a)

(b)

Figura 6.35 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e a força no mancal 1 na direção horizontal com o rotor girando a 40 Hz, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.

Embora não se tenham os resultados das funções de transferência entre o ponto de excitação e a força no mancal 2 utilizando-se o *shaker*, estas funções foram obtidas e são apresentadas nas Figuras 6.36, 6.37 e 6.38 para a excitação realizada com o atuador magnético. São apresentadas a magnitude, fase e coerência para o rotor parado e operando a 30 e 40 Hz.

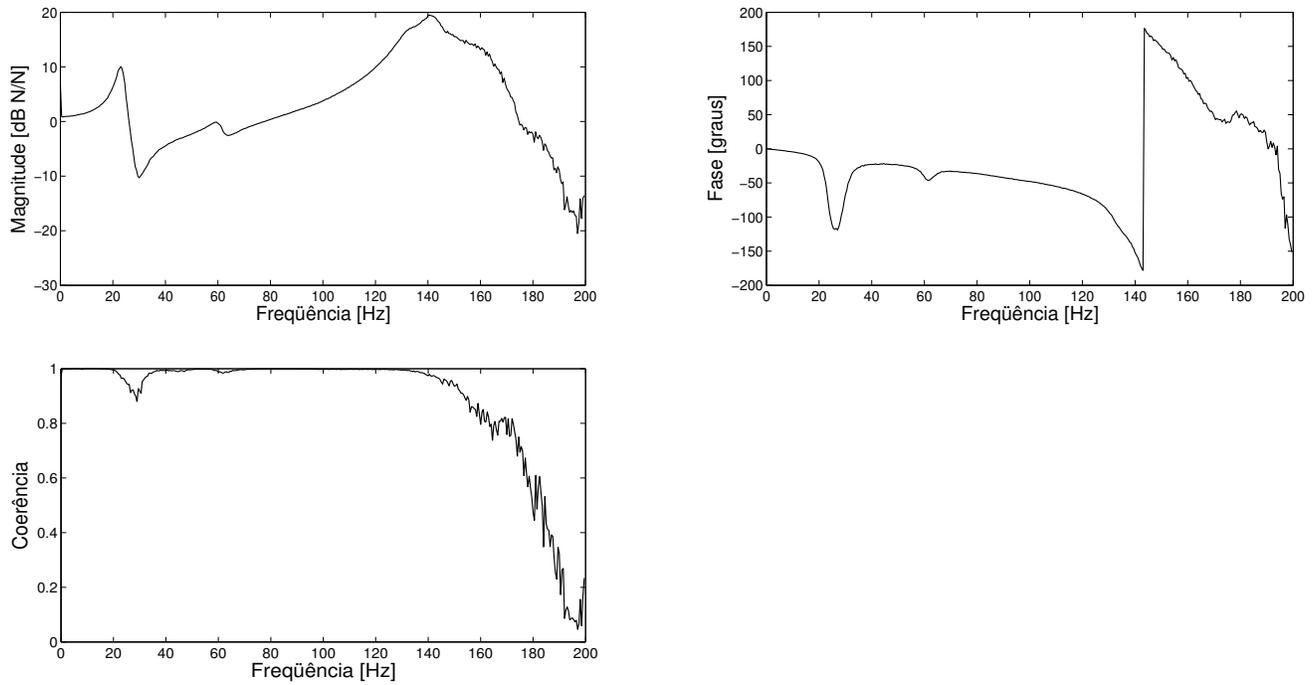


Figura 6.36 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e a força no mancal 2 na direção horizontal com o rotor parado, utilizando o atuador magnético.

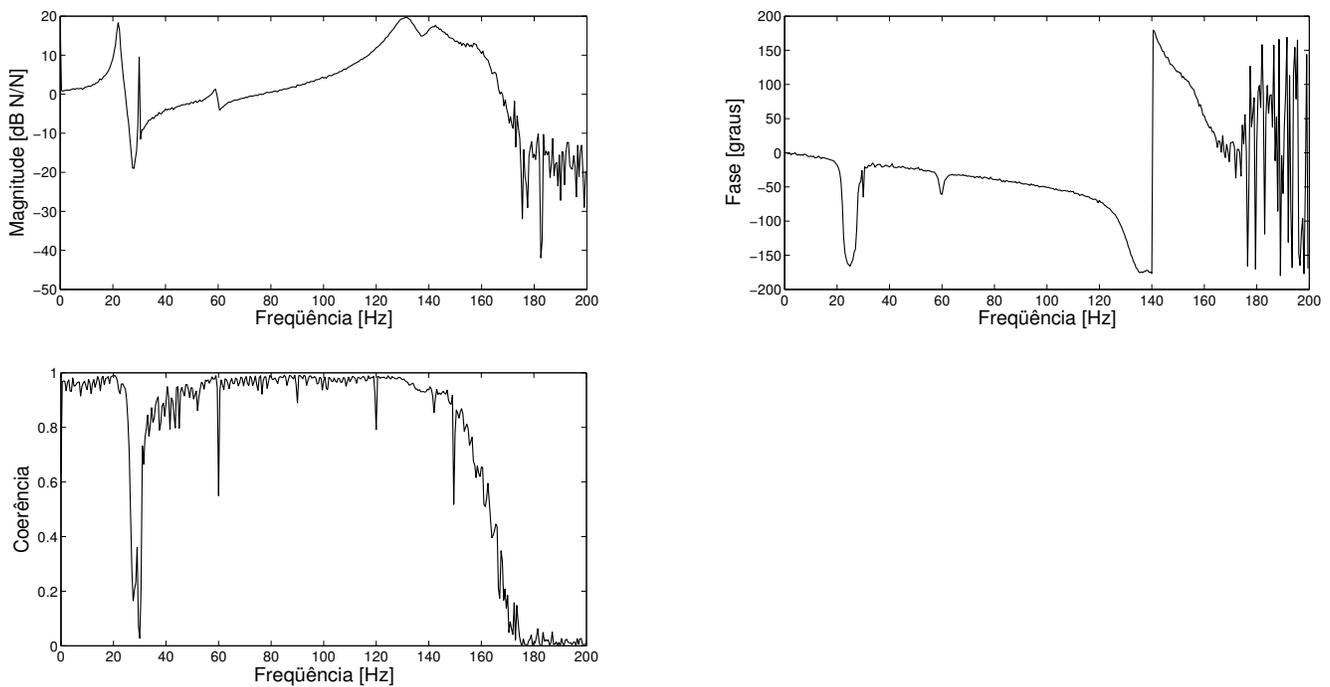


Figura 6.37 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e a força no mancal 2 na direção horizontal com o rotor operando a 30Hz, utilizando o atuador magnético.

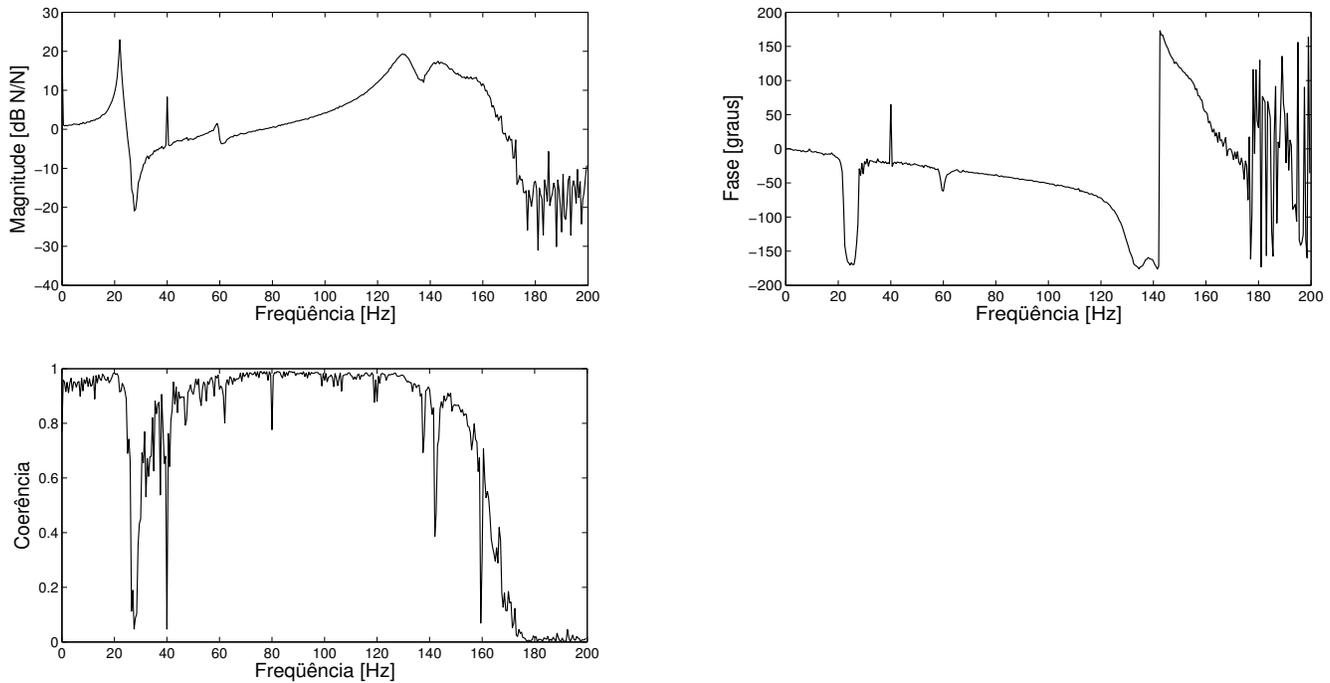
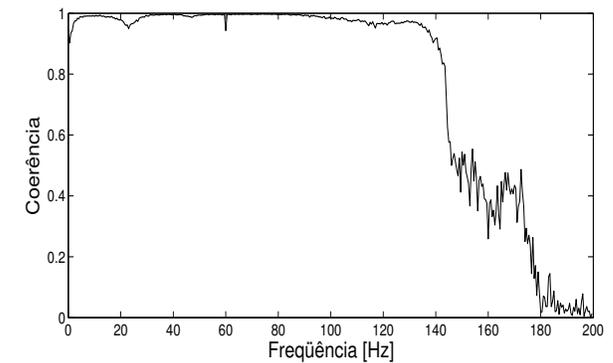
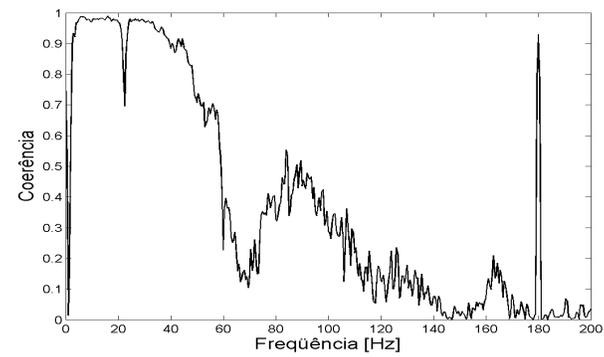
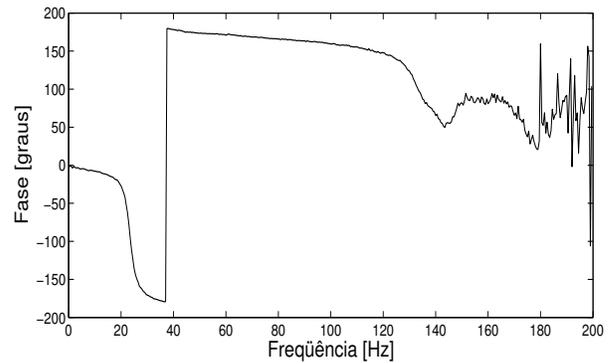
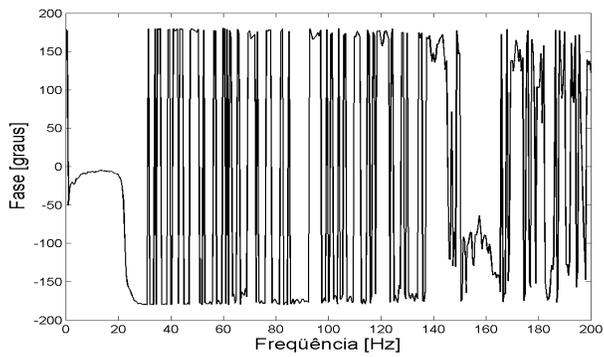
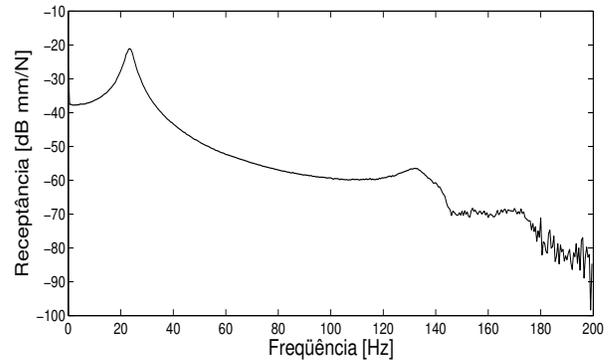
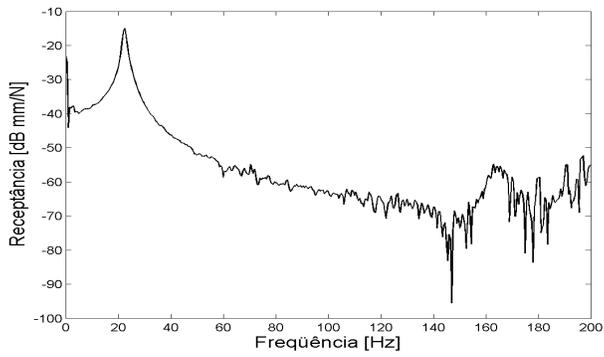


Figura 6.38 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e a força no mancal 2 na direção horizontal com o rotor operando a 40Hz, utilizando o atuador magnético.

Também foram obtidas as funções de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento horizontal da massa. A opção pelo deslocamento horizontal, e não pelo vertical, se deu pelo fato de o primeiro ser mais sensível as forças magnéticas inseridas, uma vez que o atuador gerou apenas forças horizontais no eixo.

O deslocamento na direção vertical também ocorre, mas este efeito está diretamente relacionado ao acoplamento entre o deslocamento horizontal e vertical que surge, principalmente, pela influência dos mancais. Porém, como o estudo desta influência não se insere no foco deste trabalho, apenas o deslocamento horizontal foi analisado.

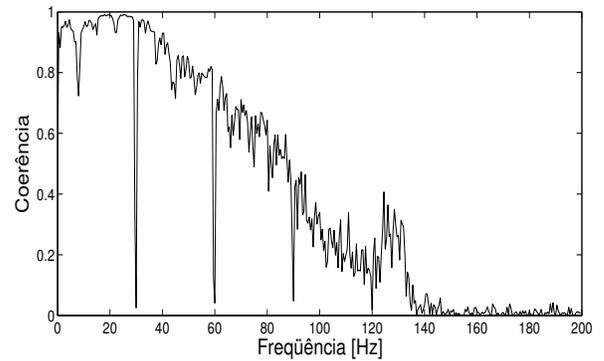
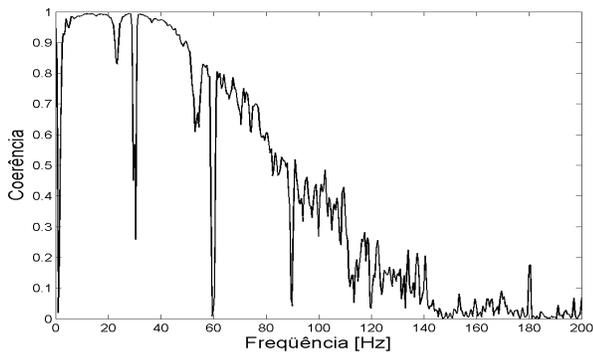
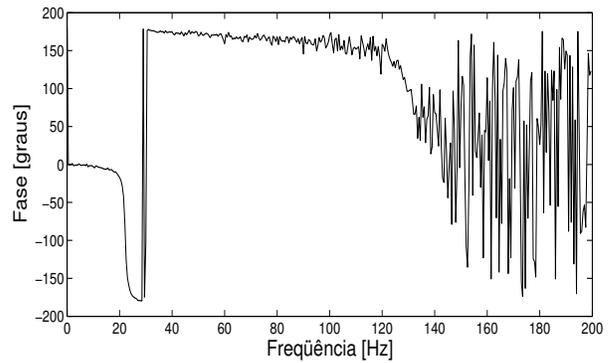
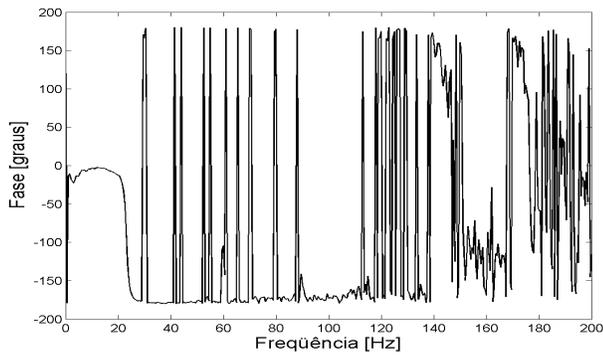
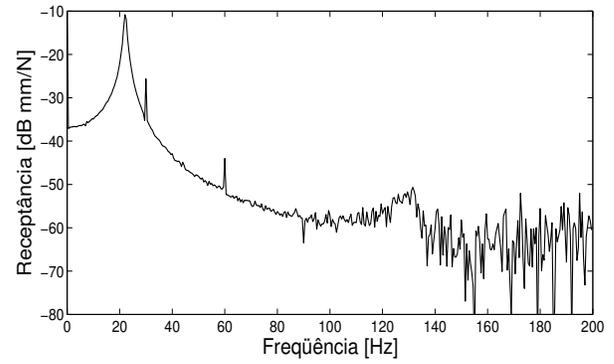
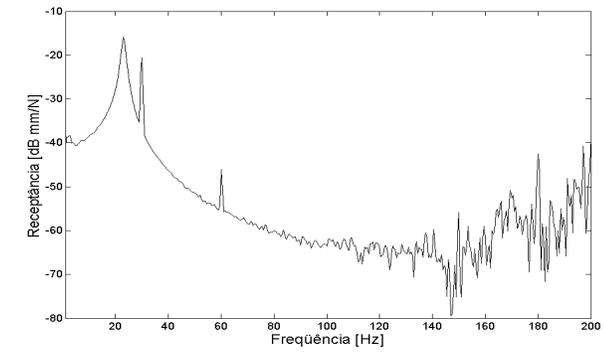
As Figuras 6.39, 6.40 e 6.41, mostram a amplitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento da massa na direção horizontal, para o rotor parado e girando, nas rotações de 30 e 40Hz, respectivamente. As respostas para a excitação realizada utilizando o *shaker* são identificadas como as Figuras 6.39(a), 6.40(a) e 6.41(a), já respostas para a excitação realizada utilizando o atuador magnético são identificadas como as Figuras 6.39(b), 6.40(b) e 6.41(b).



(a)

(b)

Figura 6.39 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento horizontal da massa com o rotor parado, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.



(a)

(b)

Figura 6.40 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento horizontal da massa com o rotor girando a 30Hz, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.

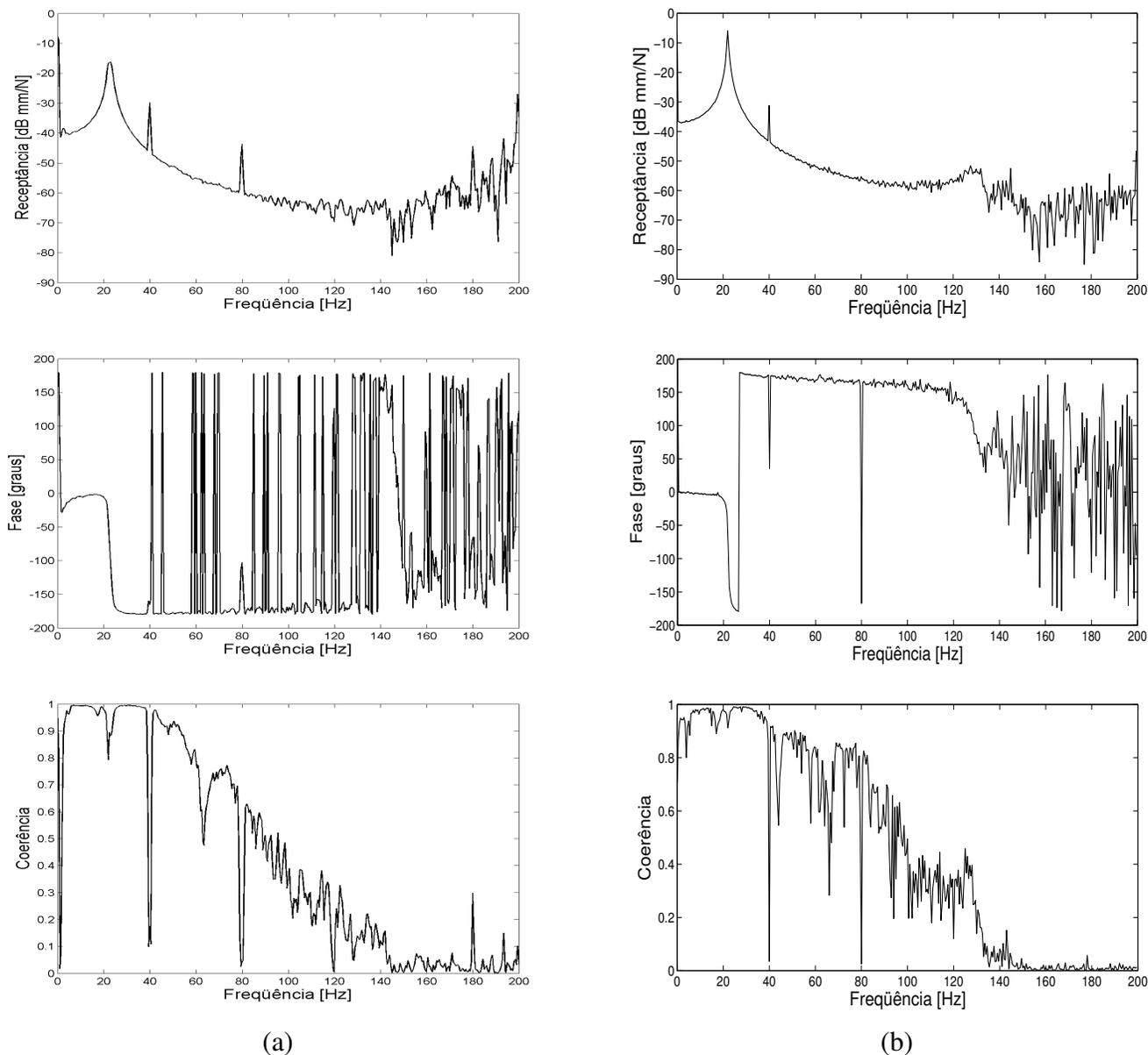
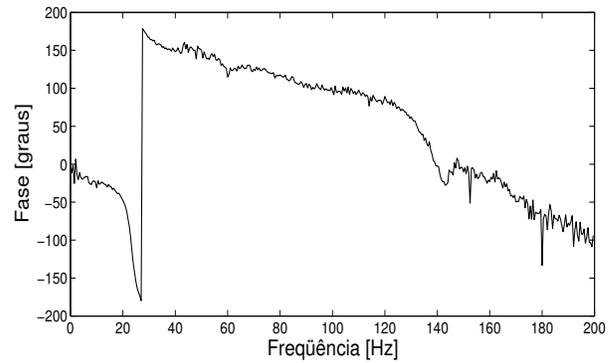
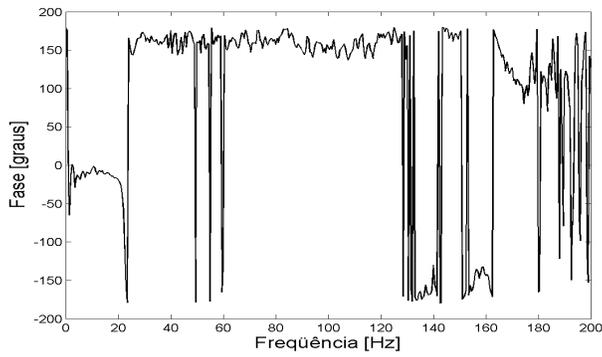
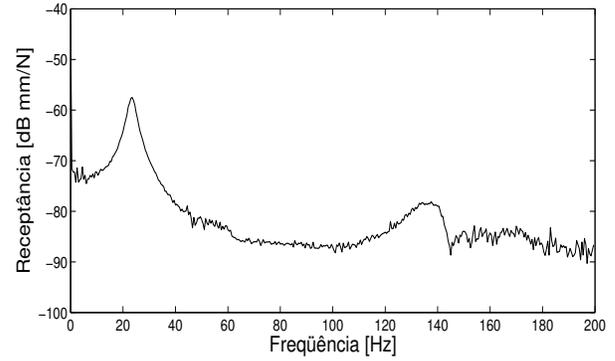
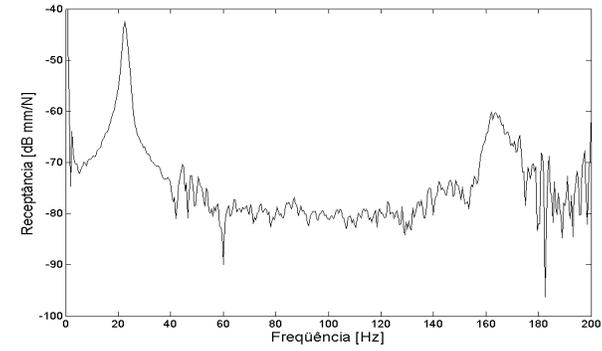


Figura 6.41 – Magnitude, fase e coerência da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento horizontal da massa com o rotor girando a 40Hz, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.

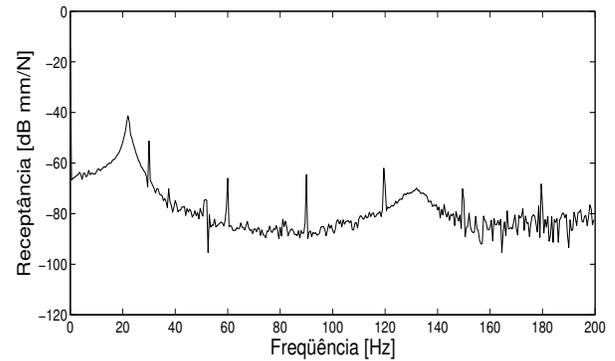
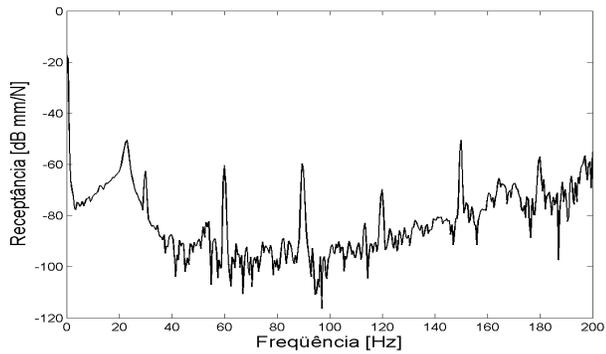
As Figuras 6.42, 6.43 e 6.44, mostram amplitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção X, como apresentado na Figura 6.10, para o rotor parado e girando, nas rotações de 30 e 40Hz, respectivamente. Utilizando o *shaker*, Figuras 6.42(a), 6.43(a) e 6.44(a), utilizando o atuador, Figuras 6.42(b), 6.43(b) e 6.44(b).

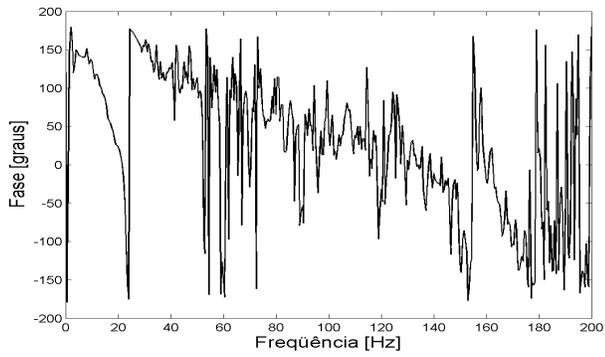


(a)

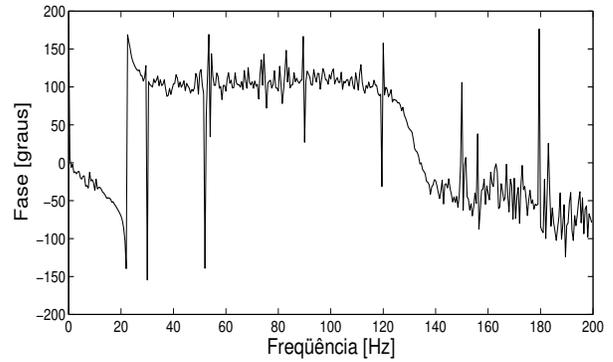
(b)

Figura 6.42 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção X com o rotor parado, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.



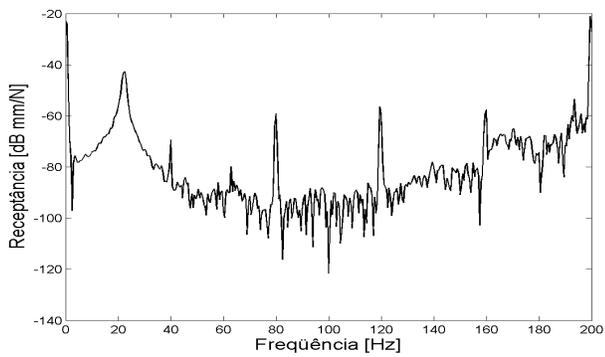


(a)

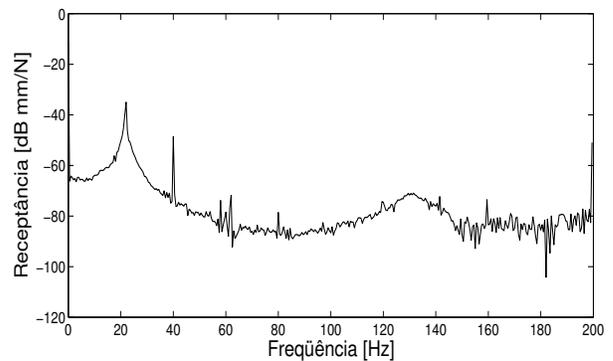


(b)

Figura 6.43 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção X com o rotor girando a 30Hz, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.



(a)



(b)

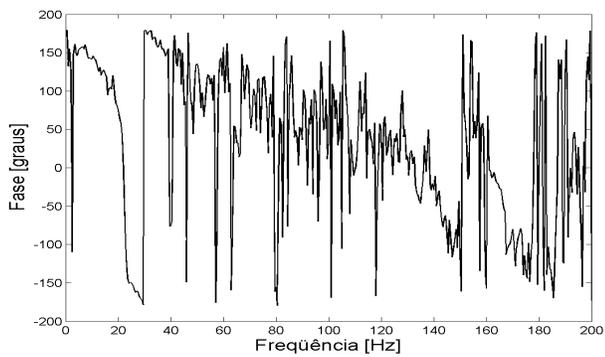


Figura 6.44 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção X com o rotor girando a 40Hz, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.

As Figuras 6.45, 6.46 e 6.47, mostram a amplitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção Y, como apresentado na Figura 6.10, para o rotor parado e girando, nas rotações de 30 e 40Hz, respectivamente. Utilizando o *shaker*, Figuras 6.45(a), 6.46(a) e 6.47(a), utilizando o atuador, Figuras 6.45(b), 6.46(b) e 6.47(b).

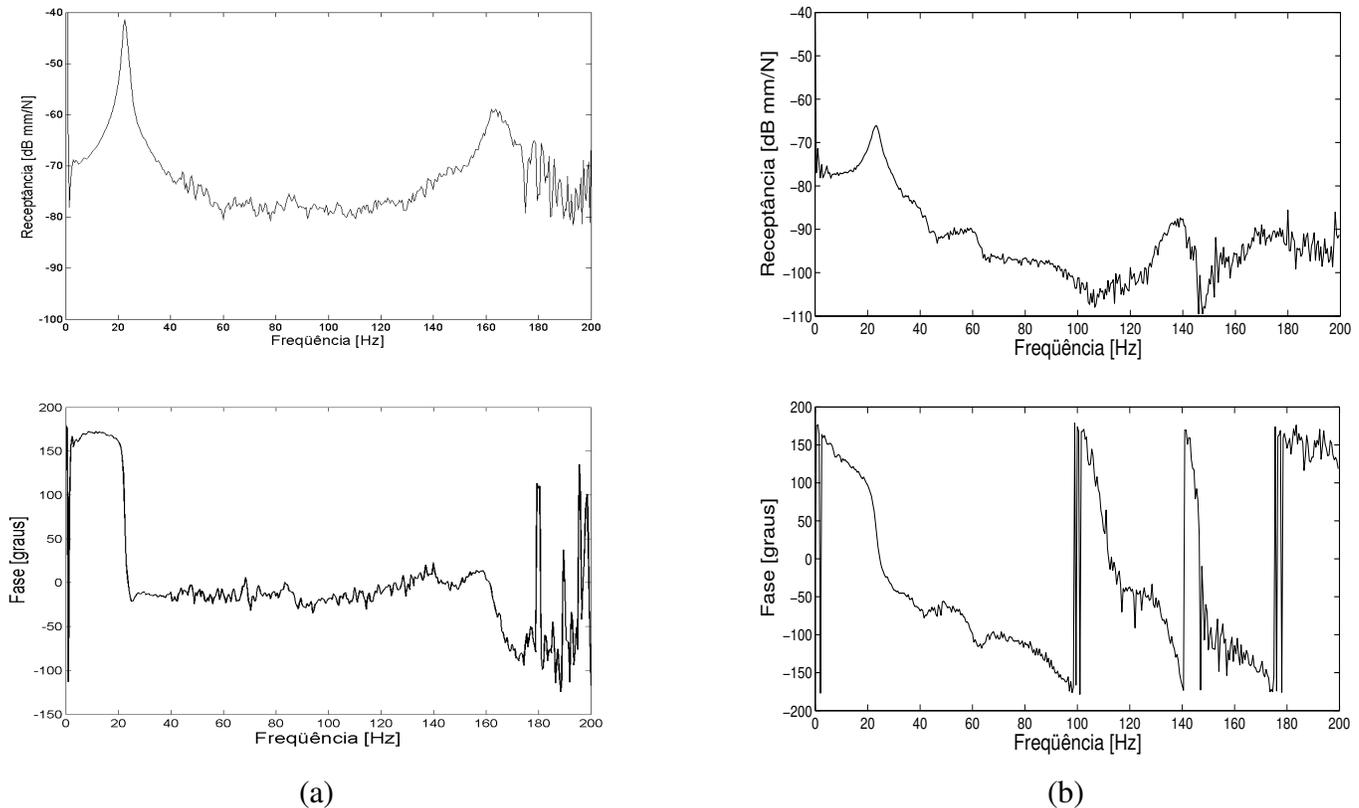
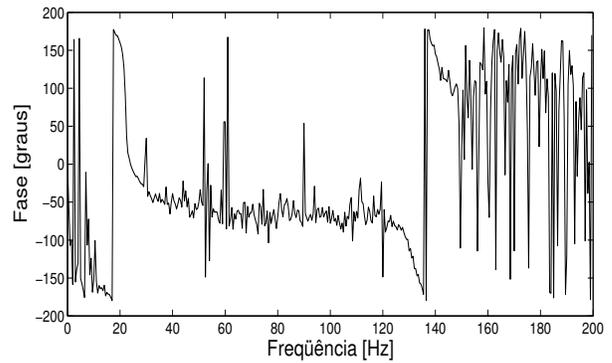
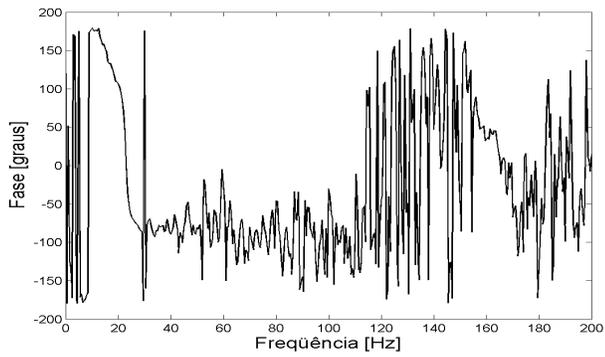
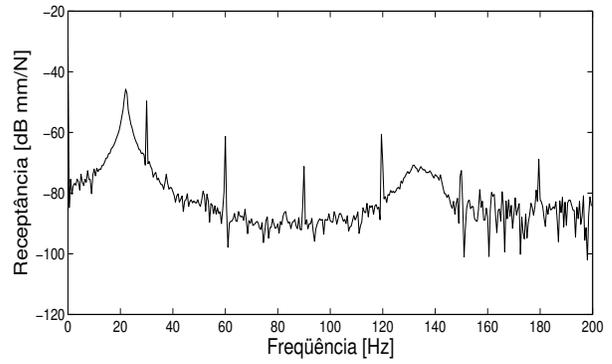
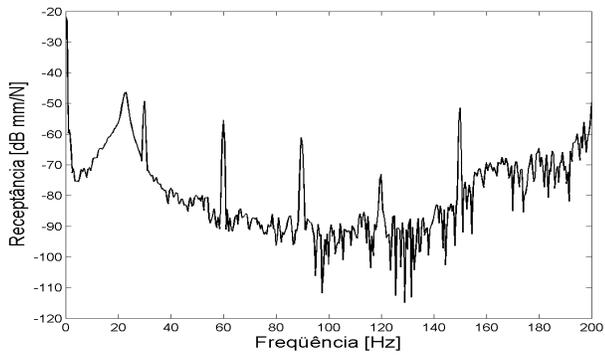


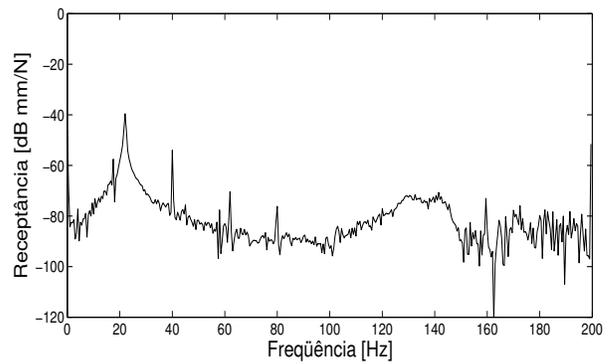
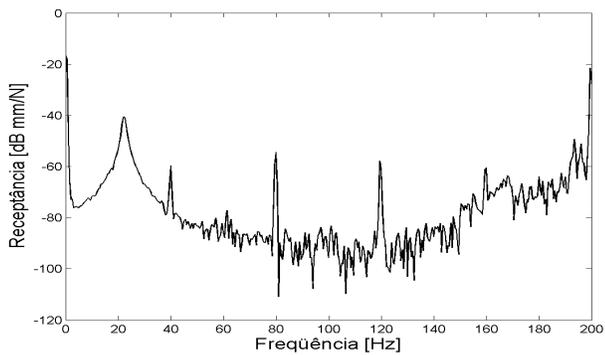
Figura 6.45 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção Y com o rotor parado, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.

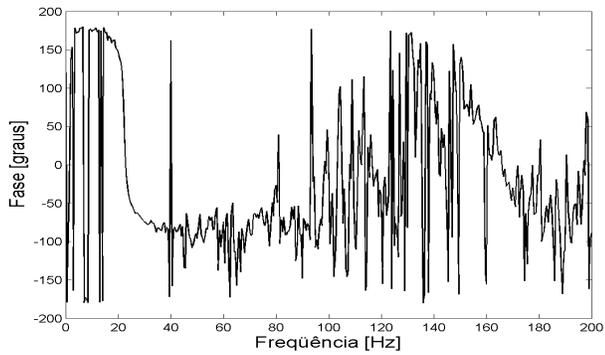


(a)

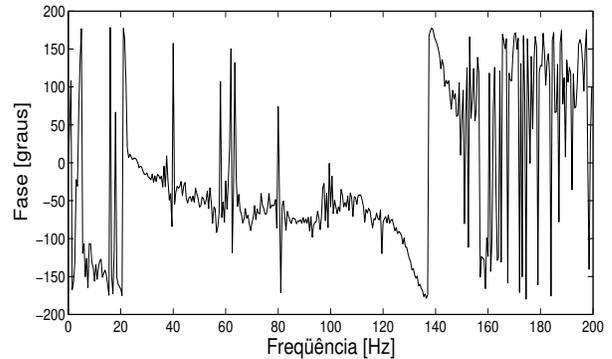
(b)

Figura 6.46 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção Y com o rotor girando a 30Hz, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.





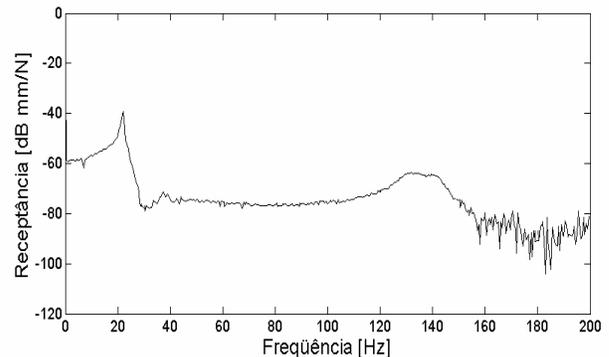
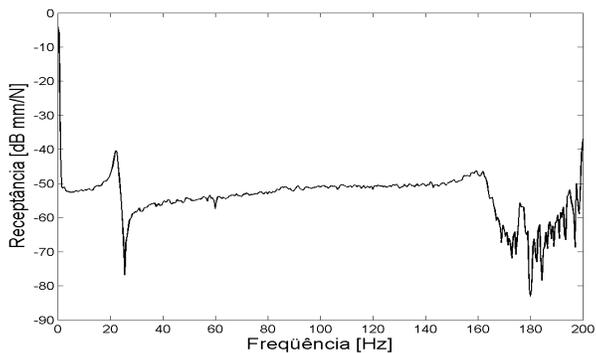
(a)

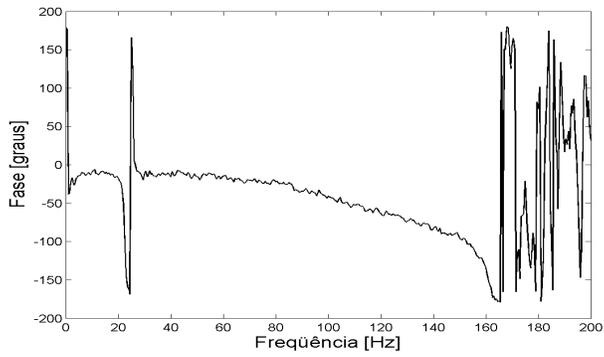


(b)

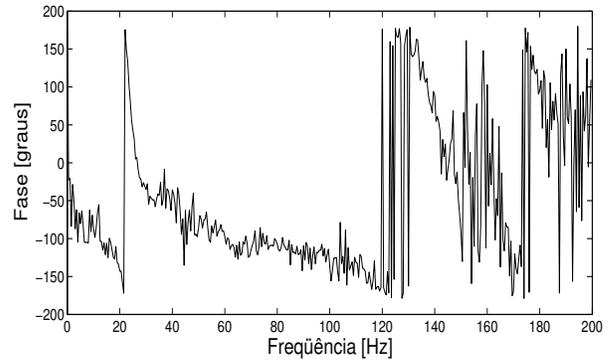
Figura 6.47 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 1 na direção Y com o rotor girando a 40Hz, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.

As Figuras 6.48, 6.49 e 6.50, mostram a amplitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção X, para o rotor parado e girando, nas rotações de 30 e 40Hz, respectivamente. Utilizando o *shaker*, Figuras 6.48(a), 6.49(a) e 6.50(a), utilizando o atuador, Figuras 6.48(b), 6.49(b) e 6.50(b).



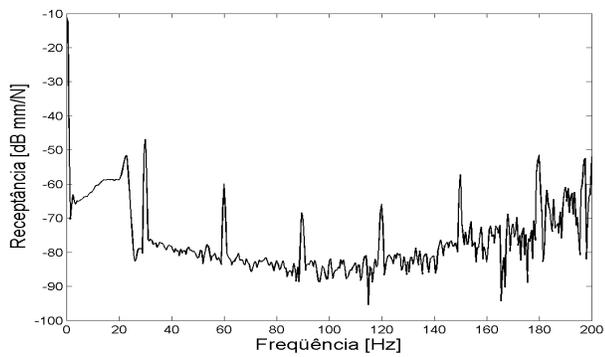


(a)

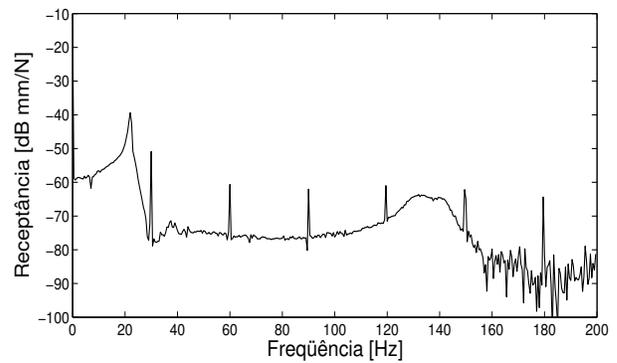


(b)

Figura 6.48 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção X com o rotor parado, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.

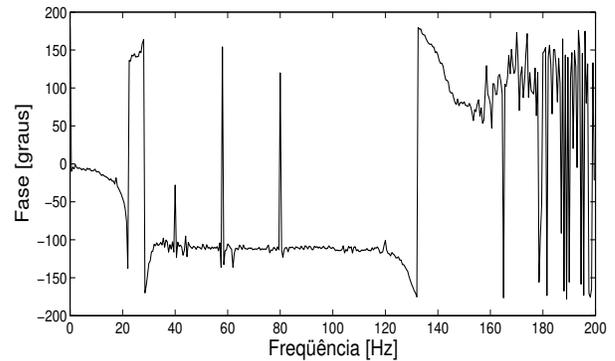
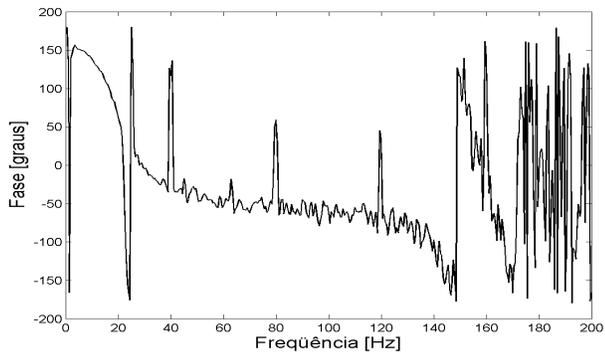
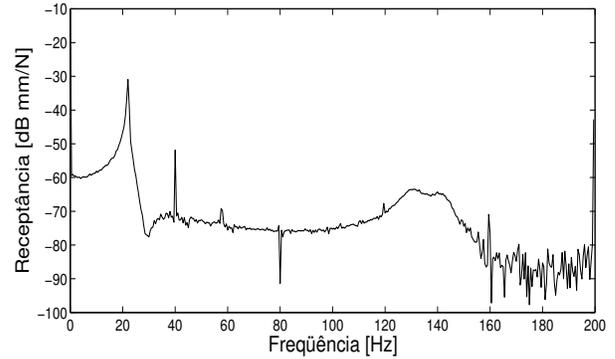
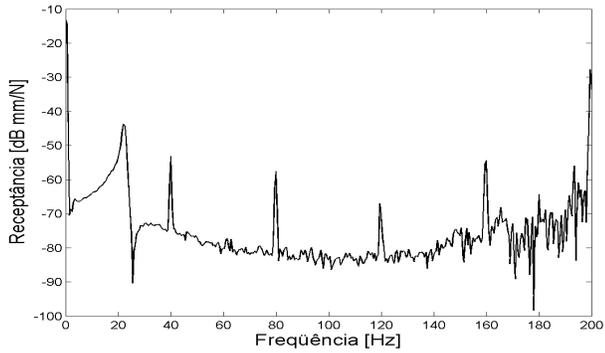


(a)



(b)

Figura 6.49 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção X com o rotor girando a 30Hz, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.

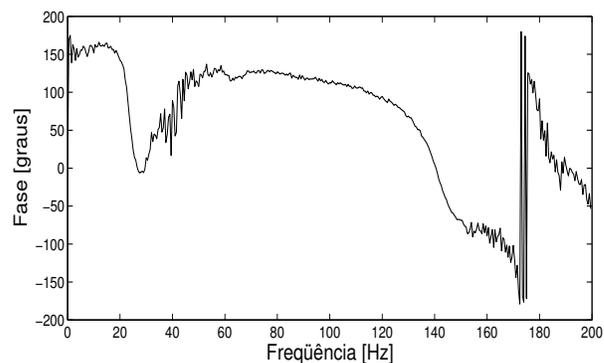
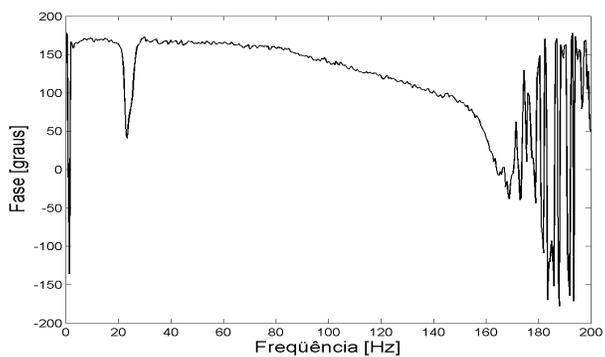
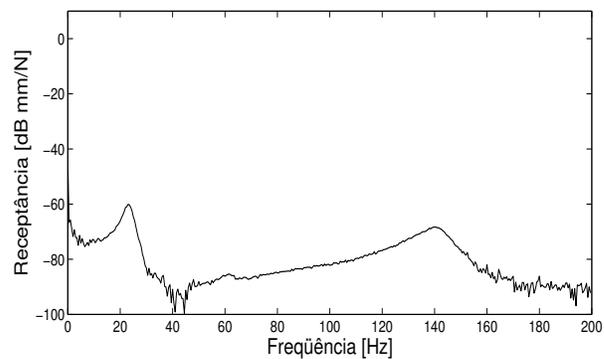
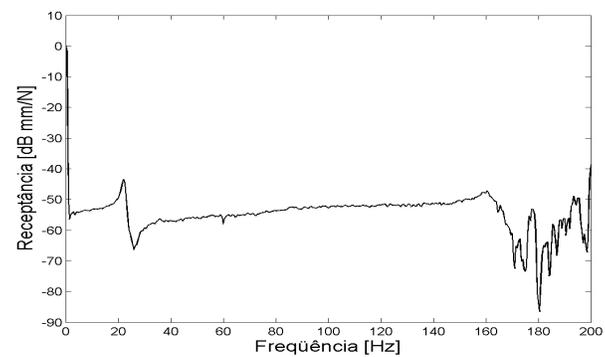


(a)

(b)

Figura 6.50 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção X com o rotor girando a 40Hz, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.

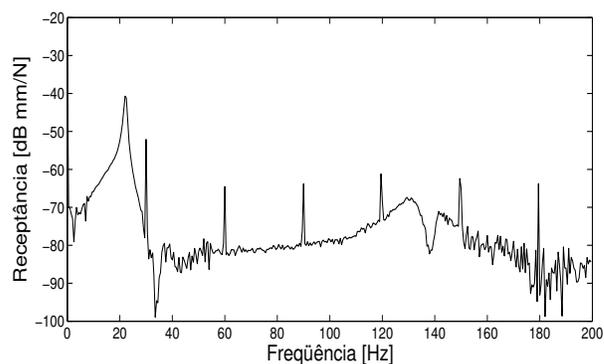
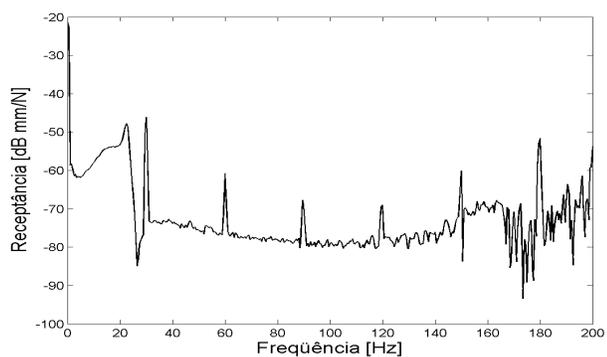
As Figuras 6.51, 6.52 e 6.53, mostram a amplitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção Y, para o rotor parado e girando, nas rotações de 30 e 40Hz, respectivamente. Utilizando o *shaker*, Figuras 6.51(a), 6.52(a) e 6.53(a), utilizando o atuador, Figuras 6.51(b), 6.52(b) e 6.53(b).

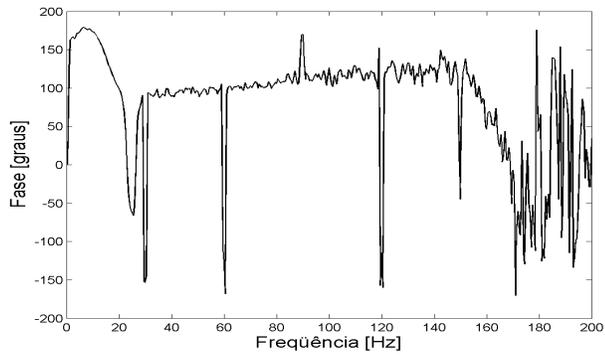


(a)

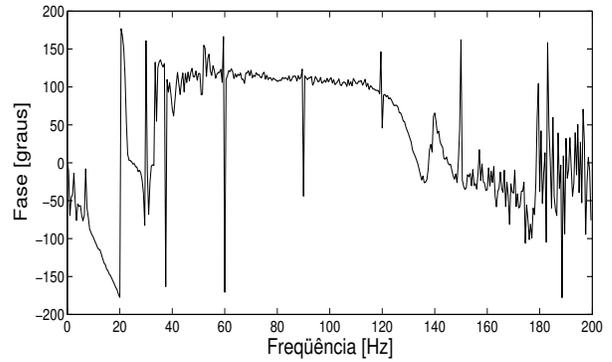
(b)

Figura 6.51 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção Y com o rotor parado, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.



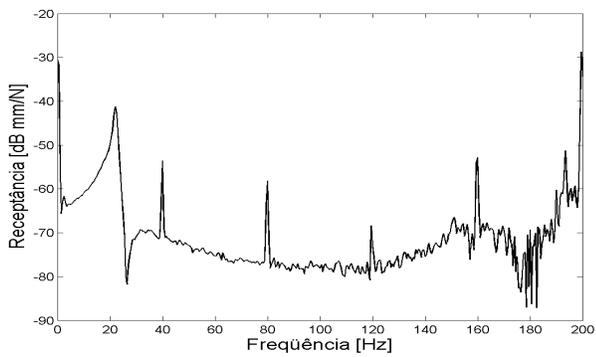


(a)

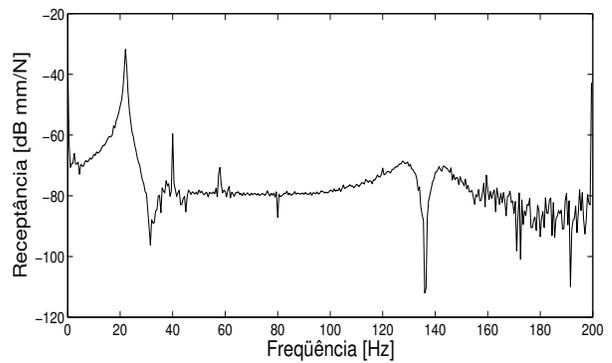


(b)

Figura 6.52 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção Y com o rotor girando a 30Hz, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.



(a)



(b)

Figura 6.53 – Magnitude e fase da função de transferência entre o ponto de excitação e o deslocamento do eixo dentro do mancal 2 na direção Y com o rotor girando a 40Hz, (a) excitação utilizando o *shaker*, (b) excitação utilizando o atuador magnético.

Observa-se que os resultados obtidos, empregando-se o atuador magnético como fonte de excitação externa, apresentaram uma sensível melhora quando comparados aos resultados obtidos utilizando-se o excitador eletromecânico e o mancal de rolamento. Este fato se deve ao problema de forças tangenciais, tais como o atrito, por exemplo, que surge quando se utiliza a técnica de excitação convencional. O emprego do atuador magnético, devido à sua própria concepção, minimiza o efeito dessas forças, possibilitando, assim, uma melhora no resultados.

Capítulo 7

Discussão, conclusão e sugestão para trabalhos futuros

Neste capítulo, é apresentada uma sucinta descrição das etapas realizadas ao longo do trabalho e as considerações finais obtidas ao final de cada etapa. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros, envolvendo a mesma linha de pesquisa.

Discussão e conclusão

O trabalho apresenta os conceitos básicos de eletromagnetismo e algumas maneiras de se calcular essas forças. Alguns conceitos foram apresentados, como relutância, permeância, fluxo magnético, e outros, já aplicados em outros sistemas, como a saturação e o laço de histerese, foram abordados na ótica do magnetismo.

Também foram apresentados modelos simples do circuito elétrico, magnético e sistema mecânico. Sendo o atuador magnético um sistema mecatrônico, estes modelos foram acoplados num modelo geral representando o modelo do atuador magnético. Em alguns casos, um modelo mais detalhado criado em elementos finitos (EF) foi empregado, como no caso do modelo contendo a posição da bobina no atuador e do sistema mecânico.

Com o modelo em EF do núcleo do atuador e das bobinas, foi possível verificar a influência da posição da bobina na geração do campo magnético. Observa-se que, posicionando

as espiras igualmente na bobina em ambos os braços do atuador, obtém-se uma distribuição uniforme da densidade de fluxo magnético, o que não se observa quando a mesma bobina se encontra concentrada em um dos braços do atuador.

A influência do perfil do pólo do atuador no cálculo da força magnética também foi estudada, utilizando o mesmo modelo em EF. Embora seja possível calcular a força magnética utilizando apenas uma equação analítica (Equação 4.16), não é possível verificar a influência do perfil do pólo no cálculo desta força. Utilizando o modelo em EF, observa-se que o caso onde as superfícies mantêm o entreferro constante (superfícies planas do pólo do atuador e da luva, ou superfícies curvas) a densidade de fluxo se apresenta de maneira mais uniforme, sendo que o caso onde as superfícies são ambas curvas concentricas apresentou melhor estimativa na força magnética. Assim, foi possível realizar um estudo detalhado da densidade de fluxo magnético no entreferro, permitindo avaliar a melhor região para colocação dos sensores hall, ou seja, a região central do pólo do atuador.

O modelo do sistema mecânico (rotor) também foi estudado, utilizando-se o método dos elementos finitos. Desta maneira foi possível observar a resposta dinâmica do sistema, estimando sua primeira frequência natural, além de verificar a influência da luva no comportamento dinâmico do rotor. Como citado anteriormente, esta luva tem a função de aumentar a área de atuação do atuador, aumentando, assim, a força magnética obtida. As Figuras 5.13 e 5.14 mostram que o uso deste dispositivo teve pouca influência na resposta dinâmica do sistema mecânico.

Outra informação importante obtida por meio dos modelos estudados, foi a ação do controlador de densidade de fluxo na geração da força magnética e na resposta em frequência do atuador. A Figura 5.16 mostra que, sem o emprego deste tipo de controlador, não foi possível obter um controle na amplitude da força magnética gerada, além do sistema apresentar uma baixa frequência de corte, com valor aproximado de 7Hz. Utilizando o controlador, a força magnética teve sua amplitude controlada e, simultaneamente, a frequência de corte do sistema subiu para cerca de 700Hz, Figura 5.17.

Como o objetivo do atuador é o de excitar as estruturas mecânicas em determinada faixa de frequência, um modelo em EF foi criado para estudar o comportamento dinâmico do suporte do atuador. Este modelo foi utilizado para se verificar os valores das primeiras frequências naturais do suporte, obtendo-se assim uma estimativa da faixa de operação deste suporte. As Figuras 5.20

e 5.21 mostram que essas frequências se encontram em torno de 1212 e 1333 Hz respectivamente, o que leva a concluir que o suporte apresentado é suficientemente rígido para a faixa de aplicação do atuador, uma vez que o modelo, empregando o controlador de densidade de fluxo, apresentou uma frequência de corte de aproximadamente 700Hz e ainda, na prática, o sistema foi operado até aproximadamente 140Hz. Os valores das frequências encontradas para o suporte, o habilitam para ser utilizado futuramente no estudo do controle de vibrações.

O desempenho do atuador foi verificado experimentalmente. Para isto, um programa específico foi criado na linguagem em LabVIEW[®] com a finalidade de gerar os sinais de excitação e realizar a aquisição e processamento do sinal.

Foi confeccionado um controlador analógico de densidade de fluxo e o ganho com a utilização do mesmo é mostrado nas Figuras 6.14 a 6.17 e 6.20 a 6.27. Nas quatro primeiras, são apresentados os valores da força e da densidade de fluxo para excitações de 30 e 40 Hz, sem o emprego do controlador. É possível notar a ausência de controle na magnitude da força, além de uma pequena diminuição da amplitude com o aumento da frequência de excitação. As Figuras 6.20 a 6.27 mostram o valor da força e da densidade de fluxo empregando-se o controlador. Nota-se que, com o controlador, foi possível obter um controle na magnitude da força magnética, além de se manter a amplitude com o aumento da frequência de excitação.

Com o atuador também foram obtidas as funções de transferência entre a força magnética e as células de carga, os sensores de deslocamento da massa, e os sensores de deslocamento dos mancais. As Figuras de 6.33 a 6.53 mostram essas funções de transferência, além de apresentarem também os dados gentilmente cedidos por Okabe (2007), para efeitos comparação.

Em quase sua totalidade, as funções obtidas utilizando o atuador magnético se apresentaram sensivelmente melhores do que as obtidas empregando-se o excitador eletromecânico e o rolamento, utilizado na conexão entre o excitador e o eixo.

As Figuras 6.33 a 6.41 apresentaram uma melhor qualidade nas respostas por se tratarem de sistemas de medição posicionados na mesma direção de aplicação da força de excitação magnética (direção horizontal). Já nas Figuras 6.42 a 6.53, embora seja possível observar as funções de transferência, pode-se notar uma queda na qualidade dos resultados, por dois motivos principais: primeiro, o deslocamento do eixo no interior do mancal é bem pequeno, quando comparado com o deslocamento da massa, por exemplo, o que diminui a relação medida/ruído.

Segundo, pelo fato dos sensores de deslocamento do eixo estarem posicionados a 45° em relação à direção de aplicação da força, Figura 6.10.

Portanto, o atuador magnético desenvolvido, foi capaz de gerar forças magnéticas para excitação sem contato, tornando-se, assim, mais uma potencial ferramenta a ser empregada na análise e diagnóstico de sistemas rotativos.

Sugestão para trabalhos futuros

Um potencial emprego do atuador magnético é sua utilização como sistema de controle de vibrações. Para se realizar controle nas amplitudes de vibração ou mesmo aplicação do atuador na análise modal complexa, faz-se necessária a construção de um novo atuador magnético capaz de gerar forças magnéticas em duas direções. Desta maneira, a construção de um novo par de atuadores posicionados no sentido vertical, se apresenta como uma interessante aplicação para o atuador.

Com a obtenção das funções de transferência, também é possível empregar ferramentas de detecção e diagnose de falhas, automatizando o sistema.

As forças magnéticas também podem ser utilizadas para alterar a rigidez do sistema rotativo durante a fase de aceleração e desaceleração da máquina, alterando assim suas velocidades críticas.

Referências Bibliográficas

- Aenis, M., 2002, *Einsatz aktiver Magnetlager zur modellbasierten Fehlerdiagnose in einer Kreiselpumpe* – Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Shaker Verlag, Aachen.
- Aenis, M., Knopf, E., Nordmann, R., 2002, *active Magnetic Bearings for the Identification and Fault Diagnosis in Turbomachinery*, - *Mechatronics* 12, pp. 1011-1021
- Aenis, M., Nordmann, R., 1999, *A Precise Force Measurement in Magnetic Bearing for Diagnostic Purpose* – 5th International Symposium on Magnetic Suspension Technology, Santa Barbara, USA.
- Allaire, P. E., 1997, *High Performance Magnetic Bearings for Aero Applications – Final Report*, NASA Grant No. NAG3-1334, Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, University of Virginia, Charlottesville, VA 22901, USA, February 5
- Antila, M., 1998, *Electomechanical Properties of Radial Active Magnetic Bearings* – *Acta Polytechnica Scandinavica*, Electrical Engineering Series, No. 92, 96pp. Published by the Finnish Academy of Technology. ISBN 952-5148-73-4. ISSN 0001-6845.
- Araújo, C. A., Lépre, F. P. N., 1993, *Controle de Vibração de Rotores Flexíveis Usando Força Magnéticas Externas*, *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*, ABCM, J. of Braz. Soc. Mechanical Science, v XV, n. 4, pp.350-390.
- Bash, T. J., 2005, *Active Magnetic Bearings used as an Actuator for Rotor Health Monitoring in Conjunction with Conventional Support Bearings*, - Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA.
- Boehm, J., Gerber, R., Kiley, N. R. C., 1993, *Sensors form Magnetic Bearings* – *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 29, No. 6, November, pp 2962-2964.
- Castro H.F., Furtado R.M., Cavalca K.L., Pederiva R., Butzek N., Nordmann R., *Experimental performance evaluation of magnetic actuator used in rotating machinery analysis*, *JBSMSE – Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, São Paulo, Brazil, pp.1-10, 2006.
- Christensen, R. H., Santos, I.F., 2005, *Control of Rotor-Blade Coupled Vibrations Using Shaft-Based Actuation*, *Proceedings of the XI DINAME*, Ouro Preto, Brasil, pp. 1-9.

- Chiba, A., Fukao, T., Ichikawa, O., Oshima, M., Takeomoto, M., Dorrell, D. G., 2006a, *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*, Elsevier, ISBN 0 7506 5727 8
- Chiba, A., Fukao, T., Rahman., M., A., 2006b, *Vibration Suppresion of a Flexible Shaft with a Simplified Bearingless Induction Motor Drive*, IEEE, pp. 836-842.
- Demierre, M., Pesenti, S., Frounchi, J., Besse, P.A.,Popović, 2002, *Reference magnetic actuator for self-calibration of a very small sensor array*, Sensor and Actuator A Vol. 97-98, pp. 39-46.
- G1 notícias, Publicação eletrônica em G1: *Gelo no combustível fez Boeing pousar na grama em Londres, diz investigação, G1 notícias*. Disponível em <<http://g1.globo.com/Noticias/Mundo/0,,MUL748248-5602,00.html>>. Acessado em: 04 Set. 2008.
- Garnier, A., Bououina, T., Fujita, H., Hiramoto, T., Orsier, E., Peuzin, J.-C., 2000, *Magnetic Actuation of Bending and Torsional Vibrations for 2D optical-scannner application*, Sensors and Actuator A, Vol. 84, pp. 156-160.
- Groehs, A., G., 2005, *Mecânica Vibratória*, Editora Unisinos, 2° Edição, 650 páginas, ISBN: 8574310034.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker J., 2007. *Fundamentos de Física 3ª*. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 379p.
- Harris, T., Widbro, L., 2003, *Magnetic Bearing – A New World Opens for Design Engineers*, World Pumps, November, pp.21-25
- Howe, D., 2000, *Magnetic Actuators*, Sensor and Actuators A., Vol. 81, pp. 268-274.
- Hsiao, F.-Z., Lee, A.-C., 1994, *An Investigation of the Characteristics of Eletromagnetic Bearing Using the Finite Element Method.*”, Transaction of the ASME, Vol. 116.
- Jang, M. J., Chen, C.L., Tsao, Y. M., 2005, *Sliding mode control for active magnetic bearing system with flexible rotor*, Journal of Franklin Institute, Vol. 342, pp. 401-419.
- Ji, J. C., 2003, *Dynamics of a Jeffcott rotor-magnetic bearing system with time delays*, Non-linear Mechanics, Vol 38, pp. 1387-1401.
- Kasarda. M. E., Marshall, J., Prins, R., 2007, *Active Magnetic Bearings Based Force Measurement Using the Multi-Point Technique*, Mechanics Research Communications 34, pp. 44-53.

- Klessen, C., Nordmann, R., Schönhoff, U., 1999, *Design of a Minimum Current Magnetic Bearing* – 5th International Symposium on Magnetic Suspension Technology, Santa Barbara, USA.
- Klessen, C., Nordmann, R., 1999, *Entwicklung kostengünstiger Magnetlager.* – Antriebstechnik, Zeitschrift für Konstruktion, Entwicklung und Anwendung von Antrieben und Steuerungen.
- Lovera, M., Astolfi, A., 2004, *Spacecraft Attitude Control Using Magnetic Actuators*, Automatica, Vol. 40, pp. 1405-1414.
- Marszolek, M., 2006, *Implementierung von Hallsensoren in einen Magnetaktor zur Kraftmessung* – Studienarbeit, Fachgebiet Mechatronik im Maschinenbau, Technische Universität Darmstadt, Deutschland.
- Maslen, E., *Magnetic Bearings*, University of Virginia, Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, Charlottesville, Virginia, 2000, 233 p.
- Melexis, Cia, *Hall Sensor Applications – Section 3*, disponível na página: http://www.melexis.com/prodfiles/0003715_hallapps.pdf, Acessado em: 20 de Maio de 2006.
- Melexis, Cia, *MLX90251– Programmable Linear Hall Effect Sensor*, Rev. 008, Nov. 2005 disponível na página: http://www.melexis.com/Assets/MLX90251_Rev008_Datasheet_4765.aspx , Acessado em: 25 de Maio de 2006
- Mesquita, A. L. A., 2004, *Identificação de Modos Operacionais e Naturais de Vibração em Máquinas Rotativas Utilizando Coordenadas Complexas*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 133 p. Tese (Doutorado).
- Nicolisky, R., Andrade Jr, R., David, D., Ripper, A., Santisteban, J. A., Pereira, A., Stephan, R. M., 2000, *Superconducting/Electromagnetic Hybrid Bearing Using Ybco Bulk Blocks For Passive Axial Levitation*. Superconductor Science And Technology, V. 13, P. 870-874.
- Nordmann, R., 2000, *Maschinenelement und Mechatronik: Skript Block A.* – Die Deutsche Bibliothek, Copyright Shaker Verlag, Printed in Germany, ISBN 3-8265-8051-6.
- Nordmann, R., 2005, *Use of Mechatronic Components in Rotating Machinery.* – Springer, Printed in the Netherlands.
- Ogata, K., 2007, *Engenharia de Controle Moderno*, 4ed. Pearson Education.

- Okabe, E. P., 2007, *Interação Rotor-Estrutura: Modelo Teórico-Experimental*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 162p. Tese (Doutorado)
- Pasquale, M., 2003, *Mechanical Sensors and Actuators*, Sensors and Actuators A, Vol 106, pp. 142-148.
- Schweitzer, G., 2002, *Active Magnetic Bearings – Chances and Limitations*, Proc. 6th Internat. IFToMM Conf. on Rotor Dynamics, Sydney, Sept 30-Oct 3.
- Schweitzer, G., 2005, *Safety and Reliability Aspects for Active Magnetic Bearings Applications – a Survey*, Proc. ImechE Vol. 219, Part I: J. Systems and Control Engineering, pp. 383-392.
- Sen, P. C., 1997, *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 615 p.
- Siegwart, R., Traxler, A., 1997, *Active Magnetic Bearings. Basics and Applications*. Update 5.97 special. – Winterthur: MECOS Traxler AG.
- Silani, E., Lovera, M., 2005, *Magnetic Spacecraft Attitude Control: Survey and Some Results* Control and Engineering Practice, Vol. 13, pp. 357-371.
- Silva, G. M., 2006, *Detecção de Falhas em Rotores Sustentados por Mancais Magnéticos Ativos*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 96 p. Dissertação (Mestrado)
- Skowronski, L., 1993 *Introduction to Magnetic Bearings*, NASA – CR – 197187, Uncla, ECE 485, 5 April, 16 pp.
- Tapia, A. T., 2003, *Modelagem dos Acoplamentos Mecânicos nos Sistemas Horizontais Rotor-Acoplamento-Mancal*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 250p. Tese (Doutorado)