

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR LUIZ CLAUDIO MARANGONI
DE OLIVEIRA..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 22.1.02.1.2006

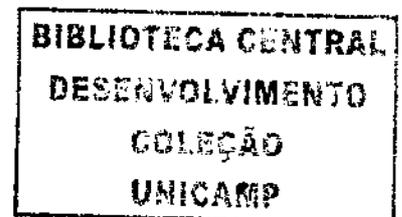

ORIENTADOR

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

**Contribuições para Melhoria do Desempenho e
Viabilidade de Fabricação de *Scanners* Indutivos**

Autor: Luiz Claudio Marangoni de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Luiz Otávio Saraiva Ferreira

42/06



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

Contribuições para Melhoria do Desempenho e Viabilidade de Fabricação de *Scanners* Indutivos

Autor: Luiz Claudio Marangoni de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Luiz Otávio Saraiva Ferreira

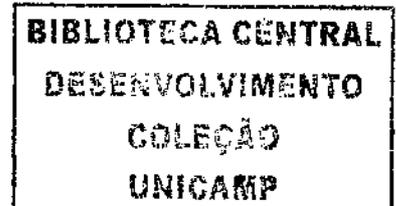
Curso: Engenharia Mecânica

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 obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2006

S.P. - Brasil



UNIDADE BC
Nº CHAMADA TIUNICAMP
OL4c
V EX
TOMBO BCI 69937
PROC 16.123.06
C D X
PREÇO 11,00
DATA 11/09/06
Nº CPD

BIB ID, 386329

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

OL4c Oliveira, Luiz Claudio Marangoni de
Contribuições para melhoria de desempenho e viabilidade de
fabricação de *scanners* indutivos / Luiz Claudio Marangoni de
Oliveira.--Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Luiz Otávio Saraiva Ferreira
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Espelhos. 2. Instrumentos óticos. 3. Dispositivos
eletromecânicos. 4. Método dos elementos finitos. 5. Ligas
(Metalurgia). 6. Ligas de não-ferrosos. 7. Metais - Fadiga. I.
Ferreira, Luiz Otávio Saraiva. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Contributions to improve the performance, and the manufacture
viability of inductive *scanners*

Palavras-chave em Inglês: Light deflectors, Modelling, Electromechanical model, Finite
elements, Phosphor-bronze

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Lucila Helena Deliesposte Cescato, Ioshiaki Doi, Renato Pavanello e
Pablo Siqueira Meirelles

Data da defesa: 22/02/2006

OL4c

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

TESE DE DOUTORADO

**Contribuições para melhoria de desempenho e
viabilidade de fabricação de *scanners* indutivos**

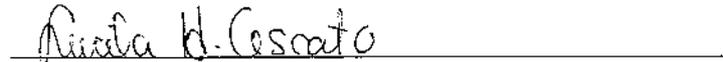
Autor: **Luiz Claudio Marangoni de Oliveira**

Orientador: **Prof. Dr. Luiz Otávio Saraiva Ferreira**

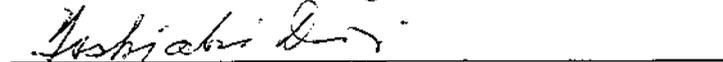
A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta tese:



Prof/Dr. Luiz Otávio Saraiva Ferreira, Presidente
Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP



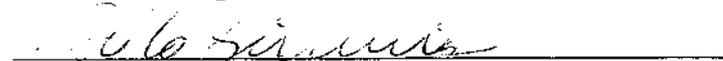
Profa. Dra. Lucila Helena Deliesposte Cescato
Instituto de Física Gleb Wataghin, UNICAMP



Prof. Dr. Ioshiaki Doi
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação,
UNICAMP



Prof. Dr. Renato Pavanello
Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP



Prof. Dr. Pablo Siqueira Meirelles
Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP

Campinas, 22 de fevereiro de 2006

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha esposa Cileia, por seu amor, dedicação e paciência, à minha filha Luiza, que me alegra e motiva mais e mais a cada dia, aos meus pais, José Luiz e Vera, por seu amor incondicional e apoio, e sobretudo à Deus, pela certeza da vitória em Jesus Cristo.

Agradecimentos

Este trabalho não teria sido realizado sem a colaboração de muitas pessoas que dedicaram um pouco de seu tempo e atenção para tornar esta pesquisa possível.

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Luiz Otávio Saraiva Ferreira, pelas sugestões, apoio e sobretudo pela amizade e confiança demonstrada ao longo deste trabalho.

Agradeço ao prof. José R. França Arruda por ceder os equipamentos de Vibrometria Laser Doppler e o seu laboratório para caracterização dos dispositivos.

Agradeço aos demais professores e à equipe de apoio do DMC, Maria Elena, Geraldo e José Luiz pela amizade e pelas sugestões e pelo suporte operacional durante a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos e companheiros de jornada Júlio César Fernandez e Alexey Marques Espíndola pelas discussões e sugestões.

Agradeço aos amigos Khaled, companheirismo e por sua ajuda na realização das medidas de Vibrometria Laser Doppler, e ao Cornelis pelas sugestões, sempre válidas, nos modelos analíticos e por elementos finitos.

Agradeço aos estudantes Márcio Rubbo, Carolina Avelar pelo desenvolvimento dos programas para caracterização dos dispositivos, e pelo auxílio na realização das medidas, e aos estudantes Márcio Maciel e Mariana, pelo auxílio na montagem dos primeiros dispositivos com rotor perfurado.

Agradeço ao LNLS por disponibilizar o processo de corte a laser, ao técnico Eli, por sua disponibilidade no corte das chapas de aço-Silício e ao Marcelo Juni pelo apoio dado nos experimentos realizados em vácuo.

Agradeço à METALFOTO S.A., na pessoa do Engenheiro Norbert Lammers, pela iniciativa e o apoio decisivo na usinagem química dos dispositivos em Bronze-fosforoso.

Agradeço à toda equipe do CCS/UNICAMP, pela disponibilização dos processos microeletrônicos para fabricação dos dispositivos em Si.

Agradeço aos colegas e companheiros de jornada do DMC, pelas conversas, sugestões e companheirismo durante este período.

Agradeço à minha esposa, Cileia, pela infinita paciência e dedicação nos bons e maus momentos ao longo deste trabalho. Esta também é uma vitória sua.

Agradeço à minha filha, Luiza, por existir e pela alegria que representa em minha vida.

“E amou o mundo de tal maneira que deu seu filho unigênito para todo aquele que nele crê não pereça, mas tenha a vida eterna”

João 3.16

RESUMO

OLIVEIRA, Luiz Claudio Marangoni, *Contribuições para Melhoria do Desempenho e Viabilidade de Fabricação de Scanners Indutivos*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 250p. Tese (Doutorado)

Scanners são dispositivos que defletem um feixe luminoso e transformam um feixe puntual em uma linha de varredura, com amplitude e frequência controladas. Diversos equipamentos utilizam este padrão luminoso para codificar ou decodificar informações, exemplos mais comuns são os leitores de código de barras de bancada, utilizados em supermercados, e as impressoras laser. Vários fenômenos podem ser empregados para defletir um feixe luminoso. Neste trabalho, os *scanners* utilizam o princípio da reflexão da luz por um espelho em movimento harmônico e ressonante sob ação de forças de origem eletromagnética. Tais forças são geradas pela interação de correntes induzidas na armadura, com o campo magnético produzido por ímãs permanentes. A principal vantagem deste tipo de *scanner* é a ausência de conexões elétricas entre as partes móveis e fixas do dispositivo, o que simplifica o processo de fabricação e o torna mais robusto e menos susceptível a falhas. Parte dos *scanners* similares existentes atualmente são dispositivos eletro-mecânicos complexos, fabricados em série. Trabalhos anteriores demonstraram a viabilidade da geometria planar e da utilização de processos de fabricação em lotes, derivados da microeletrônica, neste tipo de *scanner*. Os protótipos fabricados, embora funcionais, apresentaram consumo de potência acima da média para este tipo de dispositivo, o que demonstrava a necessidade de melhorias em seu projeto. O processo de fabricação, embora confiável, foi desenvolvido com materiais e métodos baseados no Silício e originários da microeletrônica, o que dificultava sua implantação em indústrias em território nacional. Neste trabalho, foram propostos aprimoramentos à tecnologia dos *scanners* ressonantes planares atuados por indução para tornar seu desempenho compatível com o de dispositivos similares, e também para viabilizar sua fabricação utilizando materiais e métodos disponíveis no país. Uma metodologia de projeto, em conjunto com uma série de contribuições ao modelo, foi proposta e avaliada. Para viabilizar a fabricação propôs-se a utilização do Bronze-fosforoso, como material estrutural, e a utilização de foto-fabricação, como processo de fabricação. As contribuições propostas neste trabalho possibilitaram a redução do consumo de potência de 2,2 W para cerca de 5 mW por grau óptico, e o aumento da frequência de operação do circuito de cerca de 1 kHz para 4 kHz, com um ângulo de deflexão óptico típico de 20° pico-a-pico, parâmetros compatíveis com os de dispositivos similares, mas mecanicamente mais complexos e fabricados por processo serial.

Palavras-chave

-Defletores de luz, Modelagem, Modelo Eletromecânico, Elementos Finitos, Bronze-fosforoso

ABSTRACT

OLIVEIRA, Luiz Claudio Marangoni, *Contributions to Improve the Performance, and the Manufacture Viability of Inductive Scanners*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 250p. Tese (Doutorado)

Scanners are devices that deflects a light beam and converts a spot light in a well controlled amplitude and frequency scan line. Several applications uses the generated pattern to code or decode data, common examples are barcode readers, and laser printers. A light beam can be deflected by different means. In this work, the *scanner* deflects the light by reflection in a moving mirror, in a resonant and harmonic movement, subjected to forces of electromagnetic nature. Such forces are generated by the interaction between an induced current in the armature, and a magnetic field, generated by permanent magnets. The main advantage of this kind of *scanner* is the absence of electrical connections between the mobile, and fixed parts of the device, that simplifies the fabrication process, and make its more reliable and less fault susceptible. Part of the similar devices available today are complex electro-mechanical devices, manufactured by serial process. Earlier works established that the planar geometry, and the use of batch fabrication process, derived from microelectronics, are feasible with this kind of device. Although functional, the earlier prototypes presented a high power consumption, that shown the demand for an improved design. The Silicon-based fabrication process adopted makes the use of materials and methods that are not readily accessible to the Brazilian industry. In this work improvements were proposed to the induction actuated planar resonant *scanners* technology. The goal was to make its performance compatible with the performance of similar devices, and to enable its fabrication using materials and methods available to the Brazilian industry. A design methodology, and a set of model contributions were proposed and validated. The use of Phosphor-bronze, as structural material, and the photofabrication process, as the machining method, were proposed as an option to the Silicon-based fabrication method. The contributions of this work had enabled the reduction of the power consumption from 2,2 W to about 5 mW per optical degree, and an increase in the working frequency from 1 kHz to 4 kHz, with a optical deflection angle of about 20° peak-to-peak. Such parameters are fully compatible with similar devices, mechanically more complexes and manufactured by serial processes.

Keywords

-Light Deflectors, Modelling, Electromechanical Model, Finite Elements, Phosphor-Bronze

Índice

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	ix
Nomenclatura	xi
1 Introdução	1
1.1 Visão geral sobre <i>scanners</i>	1
1.1.1 Tipos de <i>Scanners</i>	3
1.1.2 <i>Scanners</i> oscilantes	4
1.2 Revisão Bibliográfica	8
1.2.1 <i>Scanner</i> eletromagnético Ferreira e Moehlecke	10
1.2.2 <i>Scanner</i> eletromagnético Miyajima <i>et al</i>	11
1.2.3 <i>Scanner</i> eletromagnético atuado por indução de Barbaroto e Ferreira	13
1.2.4 Comparação das tecnologias	14
1.3 Objetivos deste trabalho	16
1.4 Sumário	17
2 Scanner Ressonante Atuado por Indução	19
2.1 Concepção do Dispositivo	19
2.2 Princípios físicos	19
2.2.1 A origem da tensão induzida	20

2.2.2	A origem das forças	27
2.2.3	A origem do movimento	29
2.3	Sumário	31
3	Scanner indutivo com desempenho melhorado	33
3.1	Melhoria no acoplamento magnético - Atuador fortemente acoplado	33
3.2	<i>Scanner</i> com duplo rotor	38
3.3	Sumário	40
4	Materiais e processos de fabricação	41
4.1	Processo Si-LIG	41
4.1.1	Vantagens e desvantagens do processo Si-LIG	42
4.2	Foto-fabricação em bronze-fosforoso	44
4.3	Bronze-fosforoso - LIGA UNS C52100	45
4.4	Bronze-fosforoso versus Silício	47
4.5	Sumário	48
5	Modelagem	49
5.1	Metodologia de projeto	53
5.2	Modelo Mecânico	54
5.2.1	Convenções sobre a geometria do <i>scanner</i>	55
5.2.2	Modos de vibração	55
5.2.3	Cálculo dos modos de vibração	56
5.2.4	Modelo dinâmico	68
5.2.5	Modelo dinâmico - Scanner com um rotor	68
5.2.6	Constante de rigidez torsional - k_{θ}	70
5.2.7	Modelo dinâmico - Scanner com duplo rotor	76
5.3	Modelo Elétrico	79
5.3.1	Atuador fracamente acoplado	80

5.3.2	Atuador fortemente acoplado	82
5.4	Modelo eletromecânico por parâmetros concentrados	87
5.4.1	Scanner com simples rotor	87
5.4.2	Scanner com duplo rotor	90
5.5	Modelo por elementos finitos	93
5.5.1	Estrutural	93
5.5.2	Eletromagnético	95
5.6	Roteiro de projeto	99
5.7	Sumário	102
6	Resultados	103
6.1	Arranjo experimental para caracterização dos <i>scanners</i>	104
6.2	Scanner com duplo rotor	107
6.3	Bronze-fosforoso como material estrutural	110
6.3.1	<i>Scanner</i> ressonante de 60Hz	110
6.3.2	<i>Scanner</i> ressonante de 4 kHz	115
6.4	Atuador fortemente acoplado	124
6.5	Metodologia de projeto	127
6.5.1	Scanner com um rotor	127
6.5.2	Scanner com duplo rotor	130
6.6	Modelos por elementos finitos	132
6.6.1	Estrutural	132
6.6.2	Eletromagnético	136
6.7	Sumário	141
7	Discussão dos resultados	143
7.1	Breve revisão histórica	143
7.2	Contribuições ao desempenho	145

7.3	Contribuições para viabilização da fabricação	148
7.4	Contribuições ao modelo	149
7.5	Contribuições ao projeto	151
7.6	Sugestões para próximos trabalhos	152
7.7	Conclusões	153
Publicações Resultantes deste trabalho		155
Referências Bibliográficas		157
Apêndice		170
A	Exemplos de programas APDL utilizados nas simulações	171
A.1	Simulação eletromagnética - Atuador fracamente acoplado	171
A.2	Simulação estrutural modal - <i>Scanner</i> de Bronze-fosforoso de 60 Hz	198
Índice Remissivo		215

Lista de Figuras

1.1	Um ponto luminoso é convertido em uma linha pela ação de um <i>scanner</i>	2
1.2	Mapa das principais tecnologias de <i>scanners</i>	4
1.3	Princípio de d'Arsonval aplicado nos <i>scanners</i> galvanométricos.	5
1.4	Comparação formas de onda <i>scanner</i> galvanométrico e ressoante	6
1.5	Região de operação do <i>scanner</i> galvanométrico (banda-larga) e ressonante	7
1.6	Principais erros em linhas de varredura	8
1.7	Visão esquemática e <i>scanner</i> galvanométrico proposto por Ferreira <i>et al</i>	10
1.8	Visão esquemática e dispositivo fabricado por Miyajima <i>et al</i>	12
1.9	Evolução dos <i>scanners</i> ressonantes atuados por indução.	14
1.10	Visão esquemática e dispositivo indutivo fabricado por Barbaroto <i>et al</i>	15
2.1	<i>Scanner</i> ressonante atuado por indução.	20
2.2	Conceito de indutância	23
2.3	Conceito de indutância mútua	26
2.4	Força magnética em um condutor	28
2.5	Sistema massa-mola torsional	29
3.1	Atuador fracamente acoplado e campo magnético simulado por elementos finitos. . .	36
3.2	Atuador fortemente acoplado e campo magnético simulado por elementos finitos. .	37
3.3	<i>Scanner</i> com duplo rotor	39
4.1	Processo Si-LIG	43
5.1	Três domínios físicos considerados na modelagem do <i>scanner</i>	49
5.2	Metodologia de projeto.	54

5.3	Convenções sobre a geometria do <i>scanner</i>	55
5.4	Modos de corpo rígido para o <i>scanner</i>	57
5.5	Deslocamentos no modo vertical translacional.	61
5.6	Deslocamentos no modo horizontal translacional	63
5.7	Deslocamentos no modo rotacional transversal.	64
5.8	Desenho esquemático do rotor considerando	69
5.9	Seção transversal das barras de torção com seção (a) Trapezoidal, (b) Retangular	71
5.10	Barra de torção em formato de serpentina	72
5.11	<i>Scanner</i> com duplo rotor	76
5.12	Esquema elétrico equivalente do <i>scanner</i>	79
5.13	Atuador fracamente acoplado.	81
5.14	Atuador fortemente acoplado.	83
5.15	Curva de histerese - relação não linear entre o fluxo e a corrente de excitação	84
5.16	Forma de onda da corrente no primário, da tensão induzida e da tensão do gerador.	85
5.17	Modelo eletromecânico para o <i>scanner</i> com um rotor	88
5.18	Modelo eletromecânico para o <i>scanner</i> com duplo rotor	91
5.19	Modelo elementos finitos estrutural <i>scanners</i> em Si.	94
5.20	Modelo elementos finitos estrutural <i>scanners</i> em Bronze-fosforoso	95
5.21	Convergência no valor da frequência do primeiro modo torsional para os dispositivos em Bronze-fosforoso 4KHz	96
5.22	Modelo eletromagnético do atuador por elementos finitos.	97
5.23	Rigidez torsional da barra de torção linear em Si. Perfil triangular	100
5.24	Rigidez torsional da barra de torção linear em Bronze-fosforoso. Seção retangular.	101
6.1	Sistema óptico utilizado para fixação e alinhamento da instrumentação utilizada para caracterização dos <i>scanners</i>	104
6.2	Arranjo experimental para realização da caracterização do <i>scanners</i>	106
6.3	<i>Scanner</i> indutivo com duplo rotor fabricado em Si	107
6.4	Caracterização dinâmica do <i>scanner</i> ressoante em Si	109

6.5	<i>Scanners</i> em Bronze-fosforoso.	111
6.6	Caracterização dinâmica do <i>scanner</i> ressonante em Bronze-fosforoso operando em 60Hz	113
6.7	Caracterização dinâmica do <i>scanner</i> ressonante em Bronze-fosforoso	117
6.8	Comparação relação tensão de atuação e ângulo de deflexão para <i>scanners</i> em 60Hz e 4kHz.	118
6.9	Curva de relaxação do <i>scanner</i> em Bronze-fosforoso 4KHz do	121
6.10	Resultados do ensaio de estabilidade do <i>scanner</i> em Bronze-fosforoso.	122
6.11	Resultados do ensaio de estabilidade do <i>scanner</i> em Bronze-fosforoso. Influência da temperatura	123
6.12	Dispositivo fracamente acoplado e o entreferro da ordem de cm.	124
6.13	Protótipo fabricado em fenolite para estudo de viabilidade do mecanismo de atuação fortemente acoplado.	125
6.14	Dispositivos fortemente acoplados miniaturizados.	126
6.15	Gráfico de projeto para o <i>scanner</i> com um rotor	127
6.16	Comparação entre os resultados experimentais e de projeto.	129
6.17	Comparação entre os resultados experimentais e de projeto.	130
6.18	Comparação entre os resultados experimentais e de projeto - Scanner 4kHz.	131
6.19	Configuração experimental utilizada no experimento de vibrometria laser Doppler	134
6.20	Pontos escolhidos na estrutura para medição das velocidades.	134
6.21	Comparação dos modos de vibração teóricos e experimentais	135
6.22	Densidade de fluxo magnética prevista pelas simulações por elementos finitos.	136
6.23	Arranjo experimental para obtenção dos campos magnéticos AC e DC na região da armadura.	137
6.24	Comparação entre o fluxo magnético experimental e predito pelo modelo por elementos finitos.	139
6.25	Relação entre a tensão induzida na armadura e a tensão de acionamento do dispositivo.	140
6.26	Variação predita pelo modelo FEM da tensão induzida na armadura com a frequência.	140

Lista de Tabelas

1.1	Classificação dos sistemas de varredura e exemplos de aplicações	3
1.2	Parâmetros adotados para comparação de <i>scanners</i> ressonantes	9
1.3	Principais especificações do <i>scanner</i> de Miyajima <i>et al</i>	11
1.4	Média dos parâmetros de desempenho do <i>scanner</i> de Miyajima <i>et al.</i>	12
1.5	Classificação dos sistemas de varredura e exemplos de aplicações	15
4.1	Comparação entre materiais estruturais	46
4.2	Tabela comparativa Si vs. Bronze-fosforoso	47
5.1	Domínios físicos e variáveis relacionadas.	50
5.2	Organização dos modelos propostos para o <i>scanner</i> indutivo.	52
5.3	Relação entre parâmetros físicos e parâmetros de desempenho dos <i>scanners</i> indutivos	53
5.4	Graus de liberdade e equação do movimento para os modos fundamentais de vibra- ção do <i>scanner</i>	57
5.5	Frequências naturais para diferentes modos de oscilação de <i>scanners</i> torsionais . .	66
5.6	Propriedades dos materiais utilizados nas simulações estruturais	95
5.7	Propriedades dos materiais utilizados nas simulações eletromagnéticas	96
6.1	Scanner com duplo rotor em Si	108
6.2	Scanner fabricado em Bronze-fosforoso - 60Hz	112
6.3	Scanner fabricado em Bronze fosforoso 4KHz	120
6.4	Desempenho comparativo atuadores fraca e fortemente acoplados	126
6.5	Comparação modos torsionais previstos pelo modelo FEM e experimentais	133
7.1	Especificações para diferentes formatos de vídeo	146

7.2	Scanner fabricado em Bronze fosforoso 4KHz	147
7.3	Comparação entre os parâmetros do <i>scanner</i> fabricado e <i>scanners</i> comerciais similares	148

Nomenclatura

Letras Latinas

<i>b</i>	Coeficiente de atrito viscoso	$[Kg^2 \cdot m/s \cdot rad]$
<i>f</i>	Frequência	$[Hz]$
<i>i</i>	Corrente elétrica	$[A]$
<i>k</i>	Constante de rigidez	$[N \cdot m/rad]$
<i>l</i>	Comprimento	$[m]$
<i>q</i>	Carga elétrica	$[C]$
<i>s</i>	Variável complexa	
<i>t</i>	Espessura	$[m]$
<i>v</i>	Diferença de potencial elétrico	$[V]$
<i>B</i>	Densidade de campo magnético	$[Wb/m^2]$
<i>D</i>	Largura do espelho	$[m]$
<i>E</i>	Módulo de Young do material	$[Pa]$
<i>F</i>	Força	$[N]$
<i>FF</i>	Fator de forma	
<i>G</i>	Módulo de elasticidade	$[Pa]$
<i>H</i>	Força magnetomotriz	$[A/m]$
<i>I</i>	Momento de inércia polar	$[m^4]$
<i>J</i>	Momento de inércia	$[Kg \cdot m^2]$

JJ	Densidade de corrente	$[A/m^2]$
L	Indutância	$[H]$
M	Indutância mútua	$[H]$
N	Número de espiras	
Q	Fator de qualidade	
R	Resistência elétrica	$[\Omega]$
T	Torque	$[N.m]$

Letras Gregas

ϕ	Ângulo de fase	$[rad]$
γ	Coefficiente de amortecimento	$[rad/s]$
κ	Coefficiente de acoplamento	
λ	Fluxo magnético concatenado	$[Wb]$
μ	Permeabilidade magnética	$[H/m]$
ν	Constante de Poisson	
ω	Frequência de oscilação	$[rad/s]$
ρ	Densidade	$[Kg/m^3]$
σ	Condutividade elétrica	$[mho \cdot m]$
ς	Condutividade elétrica superficial	$[U]$
χ	Susceptibilidade magnética	
Θ, θ	Ângulo de rotação	$[rad]$
Φ	Potencial elétrico	$[V]$

Subscritos

0	Natural
<i>a</i>	Referente à armadura
<i>ac</i>	AC, Alternante no tempo
<i>ae</i>	Da armadura em relação ao estator
<i>cross</i>	Ortogonal à superfície
<i>BF</i>	Referente ao Bronze-fosforoso
<i>Cu</i>	Referente ao Cobre.
<i>d</i>	Dissipativo
<i>dc</i>	DC, valor contínuo no tempo
<i>e</i>	Referente ao estator
<i>eff</i>	Efetivo.
<i>f</i>	Referente à barra de torção
<i>f</i>	<i>Free</i> ou livre
<i>i</i>	Induzido
<i>m</i>	Referente ao espelho do <i>scanner</i>
<i>mag</i>	Magnética
<i>mec</i>	Mecânico
<i>r</i>	Na ressonância
<i>S</i>	Superficial
<i>t</i>	Tangencial
θ	Torsional
θ_x	Em torno do eixo x.
θ_y	Em torno do eixo y.

θ_z Em torno do eixo z.

x, X Na direção x.

y, Y Na direção y.

z, Z Na direção z.

Abreviações

ALNICO Alumínio Níquel Cobalto

CVD *Chemical Vapour Deposition*

DMD *Digital Micromirror Device*

DOF *Degree of Freedom*

DRIE *Deep Reactive Ion Etching*

f.c.e.m. *Força contra-eletromotriz*

f.e.m. *Força eletromotriz*

FEA *Finite Element Analysis*

FEM *Finite Element Method*

FR Fotoresiste

GDL Grau de liberdade

GPIB *(General Purpose Interface Board)*

LIGA *Lithographie, Galvanoformung, Abformung*

MEMS *MicroElectroMechanical Systems*

OCR *Optical Character Recognition*

PCB *Printed Circuit Board*

PCM *Photo-Chemical Machining*

PIXEL *Picture Element*

PSD *Position Sensor Detector*

Si-LIG *Silicon-LIGA*

SMD *Surface Mounted Devices*

UNS *Unified Numbering System*

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo será apresentado um panorama da tecnologia dos espelhos móveis defletores de luz, também conhecidos como *scanners*, como passarão a ser chamados no restante desta tese.

O objetivo é fornecer ao leitor noções dos princípios físicos que governam alguns dos principais *scanners* existentes, e como estes dispositivos podem ser empregados em aplicações como projetores de imagens, leitores de código de barras, dentre outras.

Inicialmente serão apresentadas algumas definições e princípios gerais da tecnologia, seguida pela apresentação de alguns dos vários tipos de dispositivos e princípios físicos relacionados. A seguir, serão focalizados os *scanners* baseados em espelhos móveis, em especial os dispositivos do tipo ressonante e atuados por indução, que são o objeto deste estudo. Por fim será apresentado o estado atual da tecnologia e os objetivos específicos deste trabalho.

1.1 Visão geral sobre *scanners*

Os *scanners* são dispositivos dedicados à deflexão de um feixe luminoso, visível ou não, de maneira controlada e reprodutível. Na figura 1.1 é apresentada esquematicamente a função de um *scanner*. Um feixe luminoso puntual incide no *scanner* e é defletido em um ângulo variante com o tempo, $\theta(t)$, a uma velocidade $v(t)$. A partir desta deflexão forma-se um padrão luminoso no plano de trabalho. Se a frequência de deflexão do feixe luminoso for maior que o limite de percepção da

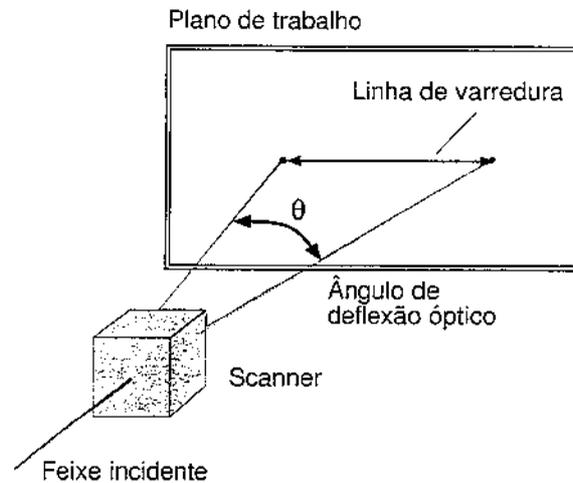


Figura 1.1: Um ponto luminoso é convertido em uma linha pela ação de um *scanner* .

visão humana ($\approx 1/33$ s), uma linha reta, denominada linha de varredura, será observada no plano de trabalho. A modulação desta linha de varredura é o princípio de funcionamento de inúmeras aplicações baseadas nos *scanners* , como os leitores de código de barras e as impressoras laser.

Aplicações baseadas na modulação/demodulação de um feixe luminoso são sistemas complexos compostos, em linhas gerais, pelos seguintes subsistemas:

- Laser;
- Sistema de lentes;
- Scanner(s);
- Modulador/demodulador;
- Sensores ópticos;
- Eletrônica de controle.

A complexidade da tecnologia dos sistemas de varredura deve-se, em grande parte, à sua abrangência. Em tais sistemas deve-se considerar, além da mecânica de controle do feixe luminoso, os aspectos relacionados à fidelidade da imagem que será gravada em papel ou filme, mostrada em um monitor ou projetada em uma tela. O estudo dos sistemas de varredura envolve conhecimentos de disciplinas como a óptica, ciência dos materiais, magnetismo, acústica, mecânica, eletrônica e processamento de imagens.

Os sistemas de varredura podem ser classificados em sistemas de leitura, escrita ou gravação.^{Beiser 1992} Os sistemas de escrita, *output scanning systems*, utilizam a energia do feixe luminoso modulado para mudar as propriedades físicas de uma superfície foto-sensível e com isso transferir as informações para este meio. Um exemplo característico deste tipo de sistema são as impressoras laser. Os sistemas de leitura, *input scanning systems*, detectam a radiação refletida ou espalhada por uma superfície e convertem esta informação, modulada pela superfície, em sinal elétrico. Como exemplo deste tipo de sistema destacam-se os leitores de código de barras. A tabela 1.1 apresenta alguns exemplos de sistemas de varredura de escrita e leitura.

Tabela 1.1: CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE VARREDURA E EXEMPLOS DE APLICAÇÕES^{MARSHALL 2004}

SISTEMAS DE LEITURA	SISTEMAS DE ESCRITA/GRAVAÇÃO
Digitalização de imagens	Gravação/impressão
Leitores de código de barras	Reprodução de imagens coloridas
Inspeção óptica de processos	Projetores de dados/imagens
Inspeção óptica de PCB's	Gravação de microimagens
Microscopia de varredura (confocal)	Armazenamento óptico
Reconhecimento óptico de caracteres (OCR)	
Visão robótica	
Análise científica	

1.1.1 Tipos de *Scanners*

Com a demonstração do laser no início dos anos 60 e sua difusão, no final da mesma década, começaram a ser desenvolvidas as primeiras aplicações dos sistemas de varredura, e com isso também os *scanners*. A evolução da tecnologia dos *scanners* pode ser verificada pelo grande número de dispositivos existentes baseados em diferentes tecnologias. Desde os DMD's, *Digital Micromirror Devices*,^{Dudley 2003} dispositivos atuados por forças eletrostáticas e utilizados em projetores de imagens, até os cilindros rotativos presentes nos leitores de código de barras de bancada utilizados nos supermercados.

A classificação destes dispositivos pode ser feita de uma infinidade de maneiras. Optou-se aqui por realizar-se uma classificação que parte do princípio físico utilizado para defletir a luz, mostrada na fig. 1.2.

Não caberia neste ponto uma discussão extensa das tecnologias apresentadas na figura 1.2, pois cada um dos dispositivos apresentados apresenta características peculiares. Informações adicionais podem ser encontradas na bibliografia referenciada. O dispositivo apresentado neste trabalho deflete a luz por reflexão óptica, possui movimento oscilante ressonante e é acionado por indução.

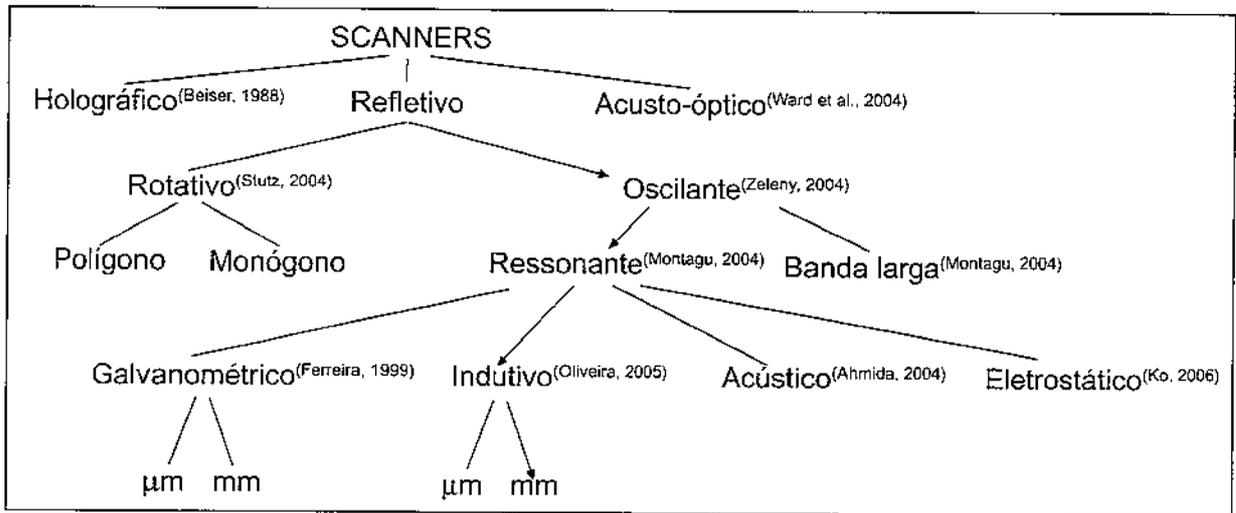


Figura 1.2: Mapa das principais tecnologias de *scanners* .

1.1.2 *Scanners* oscilantes

Os *scanners* refletivos baseados em cilindros rotativos geram não-uniformidades no feixe de varredura devido à variações existentes nas faces dos polígonos. Uma maneira de reduzir este efeito é reduzindo o número de faces nos polígonos. Quando o número de faces é reduzido a um, o polígono torna-se um monógono, que adapta-se bem aos cilindros internos presentes, por exemplo, em impressoras laser. Tal dispositivo atinge elevados ângulos de deflexão em superfícies cilíndricas. Entretanto, a inserção de lentes de campo planares¹ para obtenção de linhas de varredura planas reduz estes ângulos de deflexão a valores típicos de $\pm 30^\circ$ ópticos, resultando em limitados ciclos ativos em dispositivos que rodam 360° . Se o espelho é vibrado ao invés de completamente rotacionado, pode-se reduzir a fração desperdiçada de tempo por varredura.

Os *scanners* oscilantes incluem a família dos dispositivos galvanométricos,^{Zeleny 2004} ressonantes^{Beiser 1985} e os menos comuns piezoelétricos.^{Filhol 2005} Os dispositivos atuados por forças magnéticas predominam nesta categoria devido ao alcance e a intensidade destas forças num intervalo de milímetros.^{Judy 2001} Com isso tais dispositivos conseguem grandes deflexões ópticas, em espelhos da ordem de milímetros até alguns centímetros, o que proporciona elevada resolução.^{Beiser 1992} Os dispositivos piezoelétricos atingem elevadas frequências de varredura, mas pequena deflexão.

Tanto os *scanners* galvanométricos como os ressonantes operam baseados no princípio do gal-

¹Também conhecidas como lentes $F - \theta$, estas lentes possuem como principais características, o plano focal plano e o diâmetro do feixe luminoso constante em todo intervalo de varredura.

²A resolução é definida como o número de pontos que pode ser resolvido por linha de varredura, sendo dada por $N_\theta = \frac{\theta}{\Delta\theta}$, onde θ é a deflexão óptica e $\Delta\theta$ a largura mínima do ponto que pode ser resolvida.

vanômetro descoberto pelo biólogo e físico Jacques d'Arsonval, em 1880. Uma força eletromagnética, força de Lorentz, é gerada pela passagem da corrente elétrica por uma bobina fixa em uma mola. Tal força é contra-balanceada pela força restitutiva devido à deflexão da mola. Na condição de equilíbrio a deflexão da mola é proporcional à corrente elétrica que percorre a bobina, fig. 1.3(a).

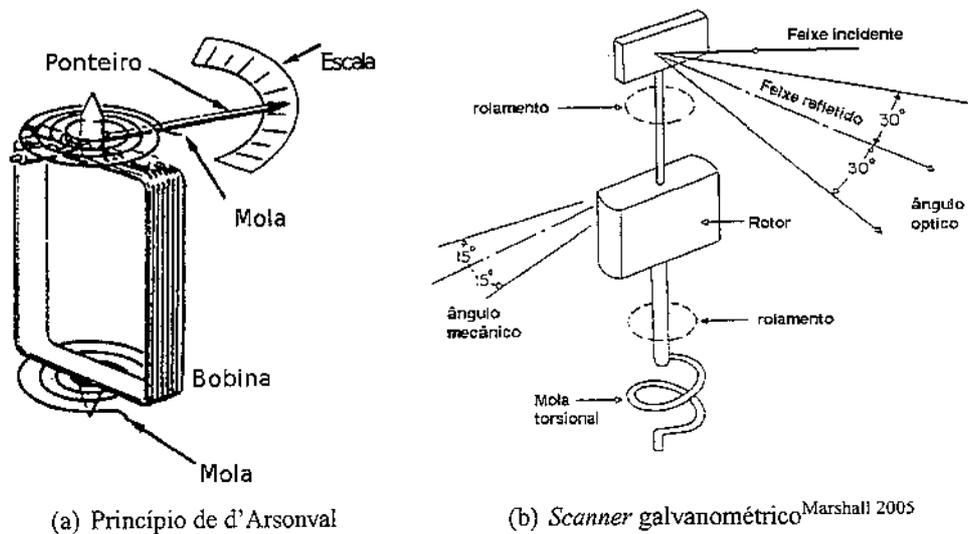


Figura 1.3: Princípio de d'Arsonval aplicado nos *scanners* galvanométricos. Uma força eletromagnética, força de Lorentz, é gerada pela passagem da corrente elétrica por uma bobina fixa em uma mola. Tal força é contra-balanceada pela força restitutiva devido à deflexão da mola. Na condição de equilíbrio a deflexão da mola é proporcional à corrente elétrica que percorre a bobina.

Os *scanners* galvanométricos, também conhecidos como galvos, são dispositivos de banda-larga que operam em um intervalo amplo de frequências, que vai desde zero até próximo à sua ressonância mecânica. Assim, uma forma de onda de varredura do tipo “dente-de-serra” é obtida com este tipo de dispositivo com um grande período de varredura linearizado. A figura 1.4 mostra a forma de onda típica de um galvo. A linearidade da linha de varredura gerada possibilita o posicionamento arbitrário do feixe luminoso (dentro da região linear do dispositivo). Alternativamente estes dispositivos também são denominados *scanners* de baixa inércia, ou *Low Inertia Scanners*³.

A redução quase total do amortecimento possibilita grandes oscilações em frequências muito próximas à de ressonância do sistema. Assim sendo, os *scanners* ressonantes podem ser caracterizados por elevadas deflexões angulares em frequências fixas e relativamente elevadas, com uma forma-de-onda praticamente senoidal. A figura 1.5 apresenta as regiões de operação dos *scanners* galvanométricos e ressonantes. Os *scanners* ressonantes atuam como um pêndulo que oscila em períodos fixos determinados pela inércia e rigidez do dispositivo.

³Esta nomenclatura deve-se a redução na inércia necessária para obtenção de deflexões angulares maiores

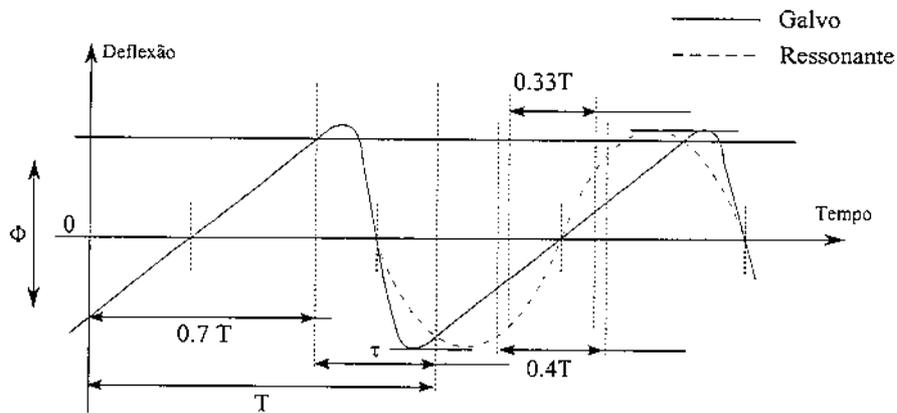


Figura 1.4: Comparação formas de onda *scanner* galvanométrico e ressoante. Considerando a forma de onda gerada por um *scanner* ressonante e um galvanométrico, este último apresenta um período de tempo linear de varredura de 70%, contra um máximo de 40%, do dispositivo ressonante. Marshall 2004

Cabe neste ponto a discussão de como qualificar a linha de varredura, quais componentes a influenciam e como acontece esta influência. Idealmente a linha de varredura deve apresentar *pixels*⁴ igualmente espaçados em toda sua extensão, sendo que sua posição deve ser a mesma durante qualquer ciclo de varredura. Limitações dos componentes geram uma série de desvios deste padrão. Os principais erros encontrados em linhas de varredura são:

Jitter ou tremulação: Desvio na posição do feixe luminoso devido à flutuações na velocidade de varredura. Medido na direção de varredura;

Wobble ou bamboleio: Desvio na posição do feixe luminoso devido à oscilações em modos outros que não o de torção, ou não-linearidades na superfície do espelho. Medido na direção perpendicular à varredura;

Não-linearidade: Variação no espaçamento entre dois *pixels* durante a varredura. Ocasionado pela natureza do movimento oscilatório do dispositivo.

Deriva mecânica: Desvio da posição estacionária do feixe de varredura devido à influência externa, como a temperatura, ou interna, como saturação magnética ou fadiga dos materiais.

Tanto nos *scanners* ressonantes como nos galvanométricos a uniformidade de varredura está relacionada majoritariamente à suspensão, ao espelho e ao rolamento. Inúmeras pesquisas buscam melhorar estes componentes visando aperfeiçoar seu desempenho. A redução do consumo de

⁴Um *pixel* é definido como o menor elemento distinguível de uma imagem. A abreviação vem do inglês, *PICTure ELe ment*.

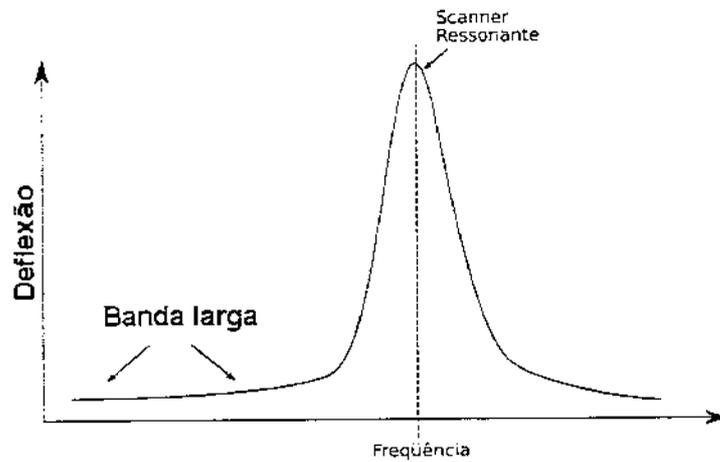


Figura 1.5: Região de operação do *scanner* galvanométrico (banda-larga) e ressonante. Marshall 2005

potência e a elevação das frequências de operação, juntamente com o desenvolvimento de novos processos de fabricação que possibilitem a produção em lote dos dispositivos, com conseqüente redução no custo unitário, também constituem objetos de pesquisa na área.

Na próxima seção serão apresentados alguns dos melhoramentos da tecnologia de *scanners* ressonantes.

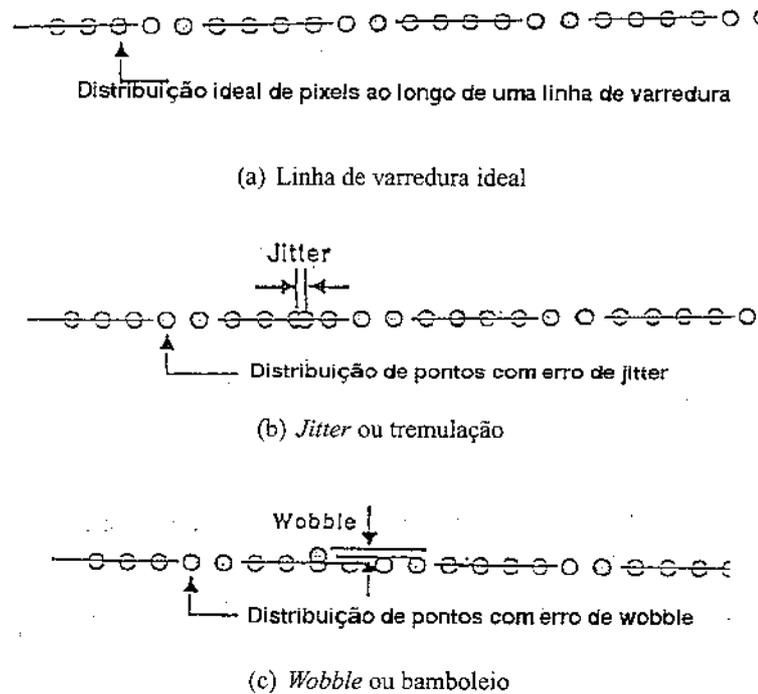


Figura 1.6: Principais erros em linhas de varredura^{Marshall 2004}

1.2 Revisão Bibliográfica

Dentre a grande variedade de tecnologias disponíveis apresentaremos nesta secção algumas que podem ser diretamente comparadas ao objeto desta tese. Os *scanners* aqui descritos possuem as seguintes características:

Ressonantes: Operam em sua frequência de ressonância mecânica, sendo que esta frequência é determinada pela geometria e material na qual o dispositivo foi fabricado. Possibilitam a obtenção de elevadas deflexões ópticas a partir de forças relativamente pequenas;

Tamanho da ordem de milímetros: Dispositivos com espelhos nestas dimensões podem manipular feixes de potência média, e grande abertura numérica⁵;

Tecnologia de fabricação planar: A utilização de tecnologia planar, em parte derivada dos processos de fabricação da microeletrônica, possibilita a fabricação em grande escala e redução nos custos dos dispositivo.

⁵Definida como um número adimensional que caracteriza o intervalo angular na qual o sistema pode receber ou emitir luz.

Esta classe de dispositivos atende à demanda de aplicações que requerem a deflexão de lasers de média potência, como os sistemas utilizados para furação de placas de circuito impresso ou na indústria do entretenimento,^{Rockwell Jr. 1981} ou sistemas que requerem grande abertura óptica, como os microscópios confocais.^{Miyajima 2001, Miyajima 2004} Outras potenciais aplicações desta categoria de dispositivos são as impressoras laser ou de offset,^{Urbach 1982} displays^{Reid 1988, Vangbo 1999} e sistemas para armazenamento holográfico de dados.^{Ho & Katti 1996}

A comparação entre dispositivos com tecnologias tão distintas pode ser feita com base em diversos parâmetros, alguns dos quais presentes na tab. 1.2. Optou-se neste trabalho por parâmetros que qualificassem o desempenho do dispositivo ou que influenciassem o custo final de produção. Outros critérios poderiam ter sido adotados. A seguir serão descritos estes parâmetros.

Tabela 1.2: PARÂMETROS ADOTADOS PARA COMPARAÇÃO DE *scanners* RESSONANTES

DESEMPENHO	
	Ângulo de deflexão óptico
	Frequência de operação
	Fator de qualidade
	Consumo de potência
	Repetibilidade da linha de varredura
FABRICAÇÃO	
	Materiais
	Processo de fabricação
DIVERSOS	
	Nível de integração
	Custos de montagem
	Fadiga dos materiais
	Qualidade óptica

Mecanismo de atuação: O mecanismo de atuação pode ser considerado a condição de contorno que estabelece uma série de outras características do dispositivo, como o tamanho e a frequência de operação. Os desvios de desempenho, como o *jitter*, o *wobble* e as não-linearidades, relacionam-se fortemente ao mecanismo de atuação adotado;

Frequência de varredura: Fisicamente relacionada à geometria do dispositivo. Em geral, varia entre poucos Hertz, como em *scanners* utilizados na varredura vertical em sistemas de imagens, até algumas dezenas de kilohertz, em dispositivos empregados para geração de imagens. Em *scanners* ressonantes varia normalmente entre 30 Hz e 20 kHz;

Ângulo de deflexão óptica: Relacionado à geometria do dispositivo e ao torque gerado pelo mecanismo de atuação. Determina, em conjunto com outros parâmetros, a máxima resolução possível para o sistema de varredura;

Fator de qualidade: Mede a seletividade do dispositivo e reflete todas as perdas do dispositivo. Influenciado por fatores como o amortecimento gerado pelo movimento do espelho no ar, não-linearidades existentes nas barras de torção, resistências elétricas na atuação, não-linearidades magnéticas, dentre outros. Em altas frequências, a única maneira de reduzir o consumo de potência é através da operação do dispositivo na ressonância com elevação do fator de qualidade.

Processo de fabricação: Relaciona-se diretamente ao custo do dispositivo. *Scanners* galvanométricos comerciais são dispositivos complexos compostos por várias partes e com montagem e calibração complexos. A utilização de tecnologia planar, derivada dos processos de microeletrônica, permite a fabricação em larga escala de dispositivos já calibrados e prontos para o uso, o que potencialmente reduz seus custos.

A seguir serão descritos sucintamente cada um dos dispositivos escolhidos para comparação.

1.2.1 *Scanner* eletromagnético Ferreira e Moehlecke Ferreira & Moehlecke 1999

O *scanner* proposto por Ferreira e Moehlecke é do tipo galvanométrico e opera na ressonância, tendo sido fabricado em Si por processos de fabricação derivados da microeletrônica e processos adicionais de usinagem química e eletroformação. É composto por um rotor quadrado ($5 \times 5mm^2$) suspenso por duas barras de torção onde foi gravada uma bobina com 20 espiras com um espelho concêntrico, fig. 1.7.

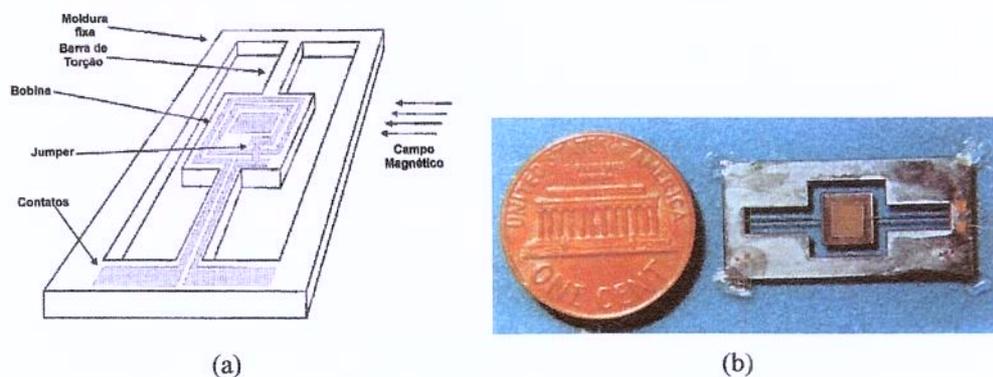


Figura 1.7: (a) Visão esquemática do *scanner* galvanométrico em Si proposto por Ferreira, e (b) Dispositivo fabricado.

O dispositivo apresentou ressonância em $1583Hz$ com uma deflexão óptica de $22^\circ pp$ e um fator de qualidade de 383. Embora, estes valores sejam razoáveis para este tipo de dispositivo, alguns problemas foram observados:

- Não-linearidade entre a tensão de acionamento e o ângulo de deflexão;
- Deformação no espelho devido ao aquecimento na bobina;
- Fadiga nas trilhas de alimentação por estas terem sido gravadas sobre a barra de torção.

1.2.2 Scanner eletromagnético Miyajima *et al*^{Miyajima 2003}

O *scanner* desenvolvido por Miyajima *et al* é do tipo galvanométrico com operação na ressonância com atuação eletromagnética e foi desenvolvido para ser utilizado no microscópio confocal modelo OLS1100 da *Olympus Optical Company, Ltd.* Esta aplicação requer elevadas frequências de varredura para uma rápida aquisição das imagens. O ângulo de deflexão também deve ser variado entre 2.1° e 16° para cobrir o intervalo de zoom óptico entre 1X a 6X. As especificações deste *scanner* estão na tab. 1.3.

Tabela 1.3: PRINCIPAIS ESPECIFICAÇÕES DO *scanner* DE MIYAJIMA *et al*

PARÂMETRO	VALOR ADOTADO
Tamanho do espelho [mm]	$> 4.2 \times 3.0$
Frequência de ressonância [Hz]	3900 – 4100
Ângulo de varredura [°optico]	2.1 – 16 (variável)
Flutuação no ângulo de varredura [%]	< 0.1
Planicidade do espelho [nmP – V]	< 244
Refletividade do espelho [%]	$> 85(\lambda = 488 - 633nm)$

Segundo as especificações de desempenho, os dispositivos deveriam apresentar elevado ângulo de deflexão (16° máx.), em frequências elevadas (4kHz). Tais requerimentos poderiam ser satisfeitos pela elevação do torque, ou pelo aumento do fator de qualidade. Neste caso, optou-se pela segunda alternativa que foi obtida através da utilização de barras de torção de polimida, e a realização de estudos sobre a geometria das barras de torção^{Miyajima 2005} de forma a reduzir suas não-linearidades.

Outra vantagem da utilização da polimida é a separação entre a espessura do espelho, fabricado em Silício e ligado à planicidade requerida do dispositivo, e espessura das barras de torção, como já citado, relacionada à frequência.

Para obter-se o torque necessário para defletir a estrutura conforme as especificações, foi necessária a redução da resistência da armadura de forma a aumentar-se a corrente sem provocar aquecimento do dispositivo, o que poderia deformar o espelho. Isto foi conseguido pelo aumento da espessura das trilhas de cobre da armadura através de eletroformação. Uma visão esquemática e o dispositivo fabricado podem ser visto nas figuras 1.8(a) e 1.8(b), respectivamente.

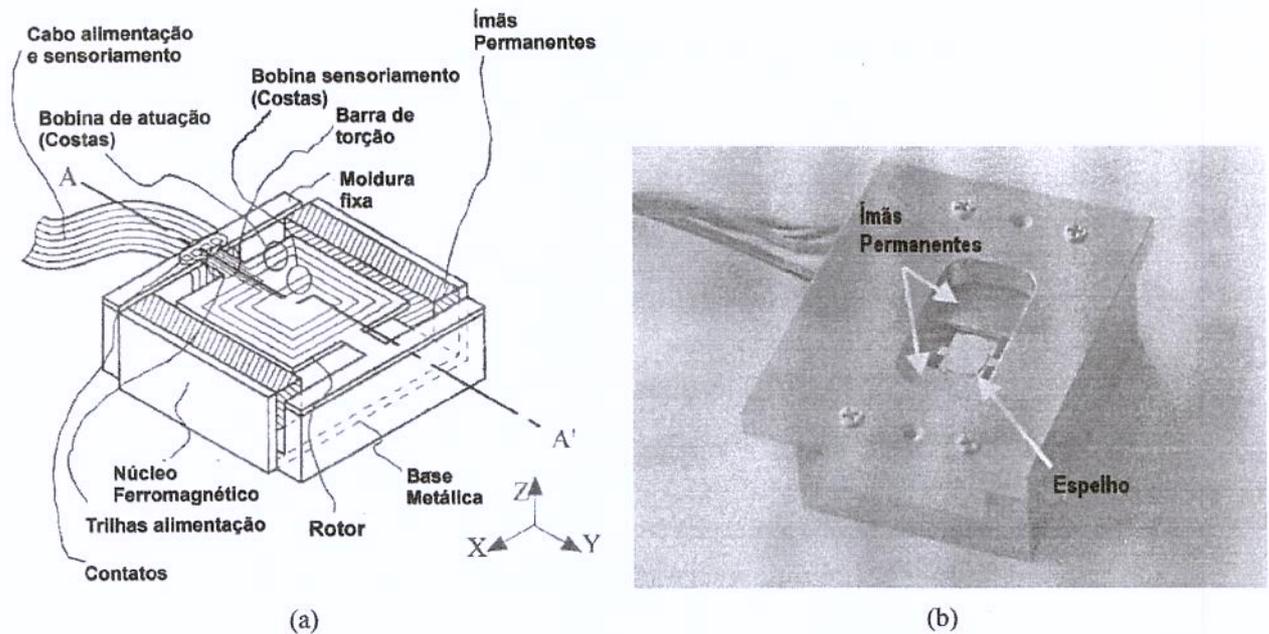


Figura 1.8: (a) Visão esquemática e (b) *Scanner* com barras de torção de polimida.

O dispositivo foi fabricado utilizando-se tecnologia planar através de processos de fabricação utilizados em micro-sistemas, tais como a oxidação, usinagem do Si por plasma (DRIE, *Deep Reactive Ion Etch*), *Sputtering* e eletroformação. A polimida foi depositada por CVD, *Chemical Vapour Deposition*. Maiores detalhes da fabricação podem ser encontrados nas referências fornecidas.

Um lote de 47 dispositivos foi fabricado e caracterizado. Os resultados obtidos, tab. 1.4, mostram que os dispositivos atingiram plenamente as especificações de projeto.

Tabela 1.4: MÉDIA DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO *scanner* DE MIYAJIMA *et al.*

PARÂMETRO DE DESEMPENHO	Valor
FREQÜÊNCIA DE RESSONÂNCIA [Hz]	4058.2
FLUTUAÇÃO NO ÂNGULO DE VARREDURA [%]	< 0.1
PLANICIDADE DO ESPELHO [$nmP - V$]	140
REFLETIVIDADE DO ESPELHO (650 nm) [%]	87.7
REFLETIVIDADE DO ESPELHO (450 nm) [%]	88.3

Uma das vantagens observadas durante a utilização do *scanner* de Miyajima foi a redução perceptível no nível de ruído durante a utilização do microscópio de 95 dB para 67 dB, quando comparado ao dispositivo galvanométrico de grande tamanho utilizado anteriormente. Outra vantagem foi a redução no tempo para alcance da condição de regime do microscópio, em aproximadamente 15 minutos o microscópio está pronto para uso, um tempo muito menor que com *scanner* galvanométrico utilizado anteriormente. Como conseqüência deste desempenho os *scanners* com polimida passaram a ser utilizados nos microscópios confocais da *Olympus*.

1.2.3 *Scanner* eletromagnético atuado por indução de Barbaroto e Ferreira^{Barbaroto 2002}

A indução eletromagnética é comumente utilizada em máquinas elétricas de indução, definidas como máquinas nas quais a corrente alternada aplicada ao circuito estator induz correntes num rotor provido de espiras curto-circuitadas.^{Hamdi 1998, Woodson & Melcher 1968} Os motores de indução, devido à sua construção simples e robusta, representam a maneira mais barata de conversão de energia elétrica em mecânica, sendo por isso mais utilizados do que qualquer outra categoria de motores elétricos.

A simplificação na construção proporcionada pela ausência de um enrolamento na parte móvel da máquina foi utilizada pela primeira vez em *scanners* em 1985 num dispositivo proposto por Montagu^{Montagu 1985} àquela época junto à empresa *General Scanning, Inc.* Este dispositivo pode ser visto na fig. 1.9(a).

O *scanner* proposto apresenta a vantagem de ser sintonizável através de um cursor anexado às barras de torção. Embora altamente funcional e utilizado até os dias de hoje, este projeto apresenta a desvantagem de possuir uma construção complexa, baseadas em processos de fabricação serial.

A idéia de Montagu permaneceu inexplorada até os idos de 1998, quando Ferreira *et al* propôs a fabricação de dispositivos indutivos de Silício, através de tecnologia planar por meio de processos de fabricação empregados em micro-sistemas.^{Ferreira 1998} Tal tecnologia possibilitaria a fabricação de dispositivos com desempenho similar aos galvanométricos existentes à época, em larga escala, a um custo potencialmente menor que tais dispositivos. Este dispositivo pode ser visto na fig. 1.9(b).

Em 2002, Barbaroto, em sua tese de mestrado,^{Barbaroto 2002} disponibilizou um processo de fabricação confiável para os dispositivos atuados por indução. Tal processo, denominado Si-LIG,^{Barbaroto 2003} alia processos de fabricação tradicionais em microeletrônica como foto-gravação, *sputtering*, e evaporação, a processos comumente utilizados em micro-sistemas, como a usinagem química anisotrópica com KOH (hidróxido e potássio), e processos derivados da tecnologia LIGA, acrônimo alemão para litografia, eletroformação e moldagem, sem a etapa de moldagem. O dispositivo proposto por Ferreira e fabricado por Barbaroto, embora funcional, apresentava baixa eficiência, modelagem incompleta e um processo de fabricação inviável no país, devido à ausência de uma indústria do Si e de empresas capazes de realizar os processos de fabricação de microeletrônica.

Comparada ao *scanner* galvanométrico do mesmo autor, esta abordagem eliminou o problema de fadiga nas trilhas e simplificou o processo de fabricação, pois as etapas de foto-gravação e soldagem da bobina foram eliminadas. Em contrapartida, necessitou-se de elevadas potências para defletir o espelho. A fig. 1.10 apresenta o *scanner* atuado por indução.

Outra questão importante é o aumento na complexidade do projeto dos dispositivos indutivos.

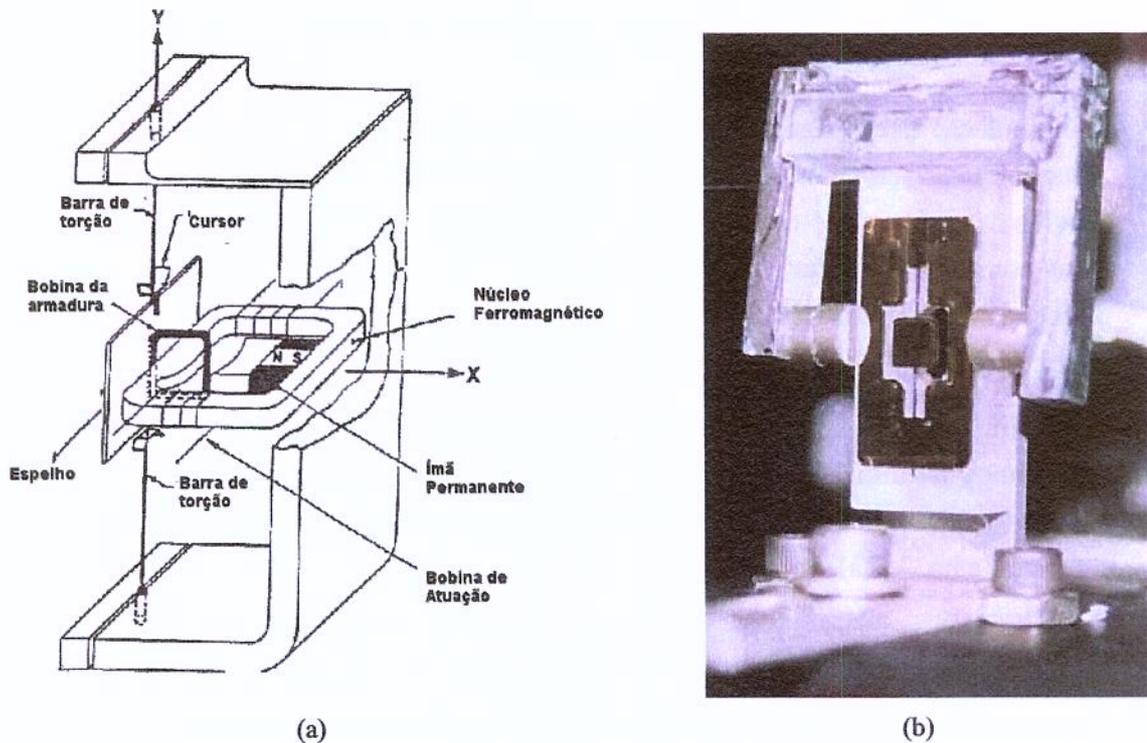


Figura 1.9: Evolução dos *scanners* ressonantes atuados por indução.(a) Dispositivo não planar proposto por Montagu e (b) Dispositivo indutivo planar proposto por Ferreira.

Modelos analíticos para a indução magnética podem ser obtidos somente para geometrias simples, de forma que geometrias complexas, como as do dispositivo proposto, requerem obrigatoriamente a utilização de métodos numéricos como o dos elementos finitos.

Os dispositivos caracterizados apresentaram ressonância em 1311Hz com deflexão óptica de 18° pp e fator de qualidade de 402. Embora estes valores estejam de acordo com os dispositivos previamente apresentados, a potência de acionamento necessária possui valores típicos de 40W , enquanto nos outros dispositivos estes valores estão na faixa de 1W .

Tais resultados demonstraram a viabilidade do *scanner* indutivo, mas mostraram também que o projeto do atuador magnético precisava ser melhorado.

1.2.4 Comparação das tecnologias

Na tab. 1.5 são resumidos os parâmetros de desempenho dos dispositivos aqui apresentado. Pode-se observar que o dispositivo de Miyajima *et al* apresenta desempenho claramente superior aos outros dois dispositivos. De fato, a utilização da polimida como material estrutural resultou em um ganho de desempenho ao custo de um processo de fabricação mais complexo.

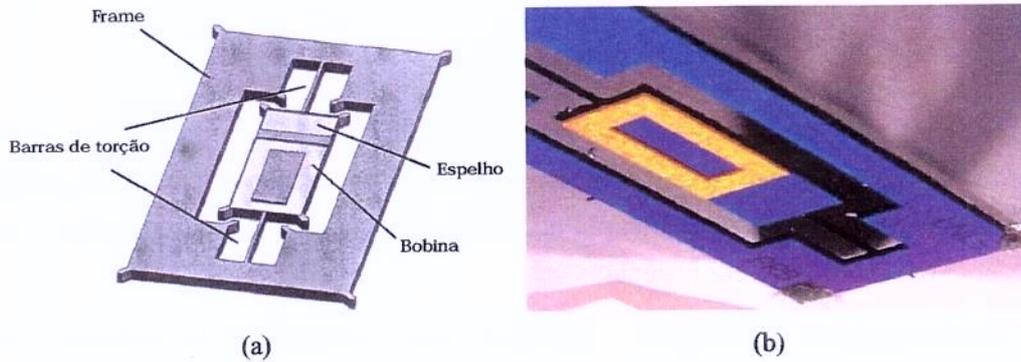


Figura 1.10: (a) Visão esquemática e (b) Dispositivo fabricado por Barbaroto. ^{Barbaroto 2002}

A eliminação do problema de fadiga nas trilhas e a simplificação do processo de fabricação proporcionados pelo dispositivo indutivo constituem vantagens comparativas em relação aos dispositivos galvanométricos, entretanto o projeto do mecanismo de atuação deve ser melhorado visando alcançar níveis de consumo de potência aceitáveis.

Tabela 1.5: CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE VARREDURA E EXEMPLOS DE APLICAÇÕES

	Miyajima 2003	Ferreira 1999	Barbaroto 2002
ATUAÇÃO	Eletromagnética	Eletromagnética	Eletromagnética por indução
TAMANHO DO ESPELHO [mm^2]	4.2×3.0	5.0×5.0	10.0×4.0
FREQÜÊNCIA DE OPERAÇÃO [Hz]	3900	1533	1311
DEFLEXÃO ÓPTICA [pp]	16	22	18
FATOR DE QUALIDADE	600	383	402
CONSUMO DE POTÊNCIA	$< 10mW$	$< 1W$	$40W$
FABRICAÇÃO	MEMS ^a	MEMS	MEMS - Si-LIG

^aPolimida

1.3 Objetivos deste trabalho

O trabalho de mestrado de Barbaroto demonstrou a viabilidade prática dos *scanners* indutivos ressonantes planares, mas evidenciou a necessidade de realização de melhorias quanto ao consumo de potência e viabilidade de fabricação no Brasil para que atingisse desempenho e custos compatíveis com os dispositivos equivalentes.

Este trabalho tem por objetivo contribuir para a melhoria de desempenho e viabilidade de fabricação dos *scanners* indutivos através da:

Sistematização do projeto: Através do desenvolvimento de modelos analíticos e por elementos finitos do dispositivo;

Melhora do desempenho: Com inovações na geometria, como o duplo-rotor, e no acoplamento magnético, como o rotor perfurado;

Viabilização da fabricação a baixo custo: Através do estudo da utilização de novos materiais, como o bronze-fosforoso, e novos processos de fabricação e montagem.

1.4 Sumário

Neste capítulo foram apresentados os conceitos elementares relacionados à tecnologia de *scanners* e principalmente aos dispositivos objetos do estudo, os *scanners* ressonantes atuados por indução.

Os *scanners* são dispositivos utilizados em aplicações como leitores de código de barras, impressoras laser, projetores de imagens, armazenamento óptico, dentre outras. As especificações de projeto, de acordo com a aplicação alvo, determinam o tipo de dispositivo que será utilizado. Parâmetros como o tamanho do espelho, mecanismo de atuação, forma de onda da linha de varredura, região de operação, estão ligados à aplicação. Os *scanners* abordados nesta tese, são indicados para aplicações como microscópios confocais, leitores de código de barras, e projetores de imagens, não podendo ser descartadas novas aplicações para a tecnologia em questão.

A revisão bibliográfica mostrou que os dispositivos ressonantes atuados por indução apresentam vantagens significativas quando comparados a dispositivos similares, como um processo de fabricação simplificado e ausência de fadiga das trilhas de alimentação, e apontou o rumo deste trabalho: a melhoria da eficiência do dispositivo e o desenvolvimento de um processo de fabricação economicamente viável no país.

No próximo capítulo serão apresentados mais detalhadamente os *scanners* indutivos ressonantes por indução, os princípios físicos de operação e os modelos existentes até o início deste trabalho.

Capítulo 2

Scanner Ressonante Atuado por Indução

Neste capítulo serão apresentados os princípios de funcionamento dos *scanners* ressonantes atuados por indução. Este capítulo servirá como fundamentação para as inovações propostas neste trabalho que serão descritas nos capítulos subseqüentes.

2.1 Concepção do Dispositivo

O *scanner* funciona de maneira similar aos motores de indução, conforme esquematizado na fig. 2.1. A aplicação de uma tensão alternada a um conjunto de bobinas no estator, gera um campo eletromagnético variável (\mathbf{B}_2) ortogonal à bobina do rotor. Uma tensão elétrica, proporcional à variação deste campo, é induzida na bobina do rotor (armadura) e uma corrente induzida é gerada (i_a). A interação entre a corrente induzida e o campo magnético DC gerado por um par de ímãs fixos (B_1) é responsável pela produção de um binário de forças de Lorentz (F_i) e conseqüentemente pelo torque na estrutura.

2.2 Princípios físicos

O *scanner* ressonante atuado por indução opera devido à conjunção de três fenômenos, indução eletromagnética, forças de Lorentz e ressonância mecânica, que serão descritos a seguir.

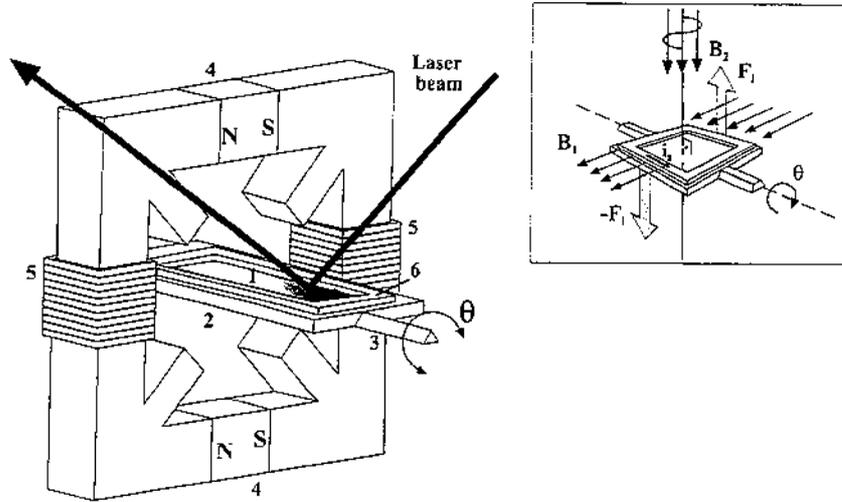


Figura 2.1: *Scanner* ressonante atuado por indução. (1) Espelho, (2) Rotor, (3) Barra de torção, (4) Ímãs permanentes, (5) Bobinas de atuação, (6) Armadura. Um campo magnético alternado, B_2 , induz uma corrente na armadura que interage com um campo magnético externo, B_1 , gerando um binário de forças, F_i . Oliveira 2006

2.2.1 A origem da tensão induzida

Para se entender o funcionamento do dispositivo é necessária a definição dos conceitos de indução para determinação da origem da tensão induzida na armadura do *scanner*.

Os campos eletromagnéticos e as respectivas fontes estão sujeitos às Equações de Maxwell. Lorrain 1988
A particularização destas leis para sistemas magnéticos, leva ao conjunto de equações descritos a seguir:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}\mathbf{J}_f \quad \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \oint_S \mathbf{J}\mathbf{J}_f \cdot \mathbf{n} da \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \oint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} da = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J}\mathbf{J}_f = 0 \quad \oint_S \mathbf{J}\mathbf{J}_f \cdot \mathbf{n} da = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\delta \mathbf{B}}{\delta t} \quad \oint_C \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \oint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} da \quad (2.4)$$

$$\text{onde} \quad \mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.5)$$

Onde:

H é a intensidade de campo magnético;
B é a densidade do campo magnético;
M é a magnetização do material;
E é o campo elétrico;
J_f é a densidade de corrente livre;
v é a velocidade dos elétrons;

A eq. 2.1 é a lei de Ampère-Maxwell, adaptada ao nosso sistema pela eliminação do termo referente às correntes de deslocamento. Esta equação afirma que um campo magnético pode ser gerado por uma corrente elétrica¹. A eq. 2.2 é conhecida como lei de Gauss do magnetismo, e afirma que não existem monopólos magnéticos, e a eq. 2.3 afirma que existe conservação das cargas elétricas no sistema em questão.

A eq. 2.4 representa a forma diferencial e integral da lei de Faraday, que afirma que um campo magnético variante no tempo produz campo elétrico².

Em adição a estas equações, são necessárias relações constitutivas pra descrever como as propriedades físicas dos materiais afetam os campos e suas fontes. A densidade de magnetização, **M**, é introduzida para que sejam levados em conta os efeitos devido a materiais magnetizáveis. A relação mais conhecida para **M** está na forma:

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} \quad (2.6)$$

onde χ_m é a susceptibilidade magnética. Alternativamente, pode-se expressar esta relação definindo-se a permeabilidade magnética como $\mu = \mu_0(1 + \chi_m)$, onde μ_0 é a permeabilidade no vácuo, dada por:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$$

Desta forma a eq. 2.6, pode ser escrita como:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.7)$$

Que será a equação fundamental para descrição dos materiais magnéticos.

¹ Outra forma de gerar um campo magnético seria através de um campo elétrico variável. O termo não considerado, referente à corrente de deslocamento, relaciona-se a este fenômeno.

² Em contraposição, a lei de Ampère afirma que um campo elétrico variante produz um campo magnético, $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\delta \mathbf{E}}{\delta t}$

Em um material estacionário, as correntes elétricas surgem a partir da condução pela ação de um campo elétrico. Pela lei de Ohm tem-se:

$$\mathbf{J}_f = \sigma \mathbf{E} \quad (2.8)$$

onde σ é a condutividade. Uma equação constitutiva similar relaciona uma densidade de corrente superficial, \mathbf{K}_f ao campo elétrico tangencial à superfície, \mathbf{E}_t :

$$\mathbf{K}_f = \sigma_s \mathbf{E}_t \quad (2.9)$$

onde σ_s é a condutividade superficial. Estas duas equações constitutivas são modelos macroscópicos para a migração de cargas em um material devido à influência de um campo magnético.

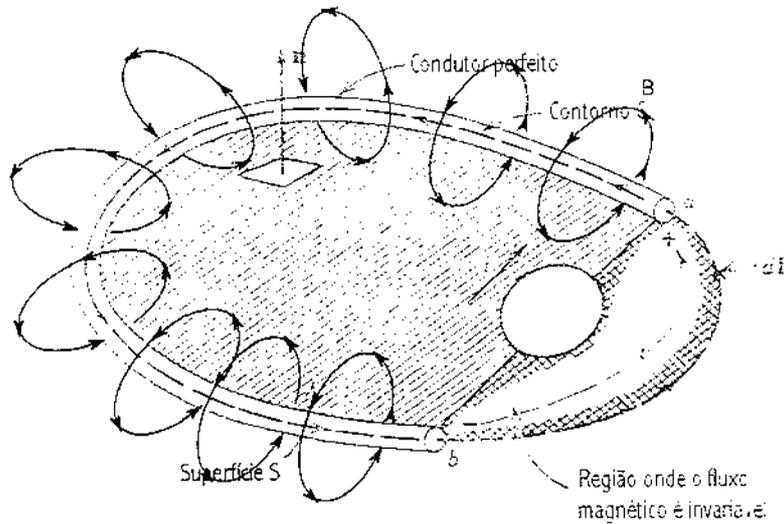


Figura 2.2: Conceito de indutância. ^{Woodson & Melcher 1968} A passagem de corrente elétrica alternada em um condutor gera um fluxo magnético concatenado. A relação entre este fluxo e a corrente que o gerou é a indutância.

Indutância generalizada

Parte-se de um condutor elétrico em um sistema quase-estático³ como visto na fig. 2.2. A demonstração começa com a descrição dos campos eletromagnéticos e então deriva-se a indutância, vista a partir dos terminais do condutor, quando o sistema é posto em movimento.

Suponhamos um condutor ideal imerso em um meio sem perdas magnéticas, formando um percurso sem perdas elétricas entre os pontos a e b e excitado por uma fonte de corrente i , como ilustrado na fig. 2.2

Define-se um contorno C que passa através dos terminais e está fixo ao condutor. A porção do contorno que passa por fora do condutor é fixa em uma região com densidade de fluxo magnético desprezível. Assim sendo, a tensão nos terminais do condutor será dada por:

$$\mathbf{E} = \nabla\Phi \tag{2.10}$$

$$\Phi_a - \Phi_b = v = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \tag{2.11}$$

³Sistema na qual desconsidera-se a variação das fontes de campo e a deformação do meio no tempo. Desta forma, \mathbf{B} e \mathbf{H} são determinados como se o sistema fosse magnetostático.

De acordo com a lei de Faraday,

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} da \quad (2.12)$$

pode-se relacionar a tensão gerada nos terminais do condutor com a densidade de campo magnético, \mathbf{B} , na área definida pelo contorno C , na direção normal à superfície.

$$v = \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} da \quad (2.13)$$

Por conveniência definimos o fluxo concatenado λ como:

$$\lambda = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} da \quad (2.14)$$

e reescrevemos a tensão nos terminais como:

$$v = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.15)$$

Para determinar a tensão nos terminais é necessário saber como o fluxo concatenado varia com o tempo. Para responder a esta pergunta, vamos supor um sistema com geometria fixa, exceto por uma parte com movimento em x , e vamos supor também que a magnetização, M , é somente função da corrente (o que implica que B seria função unicamente da corrente). A partir destas suposições, podemos escrever o fluxo concatenado como:

$$\lambda = \lambda(i, x) \quad (2.16)$$

Substituindo a eq. 2.16 na eq. 2.15 e expandindo as derivadas temporais obtém-se:

$$v = \frac{d\lambda}{dt} = \underbrace{\frac{\delta\lambda}{\delta i} \frac{di}{dt}}_{\text{Tensão de transformação}} + \underbrace{\frac{\delta\lambda}{\delta x} \frac{dx}{dt}}_{\text{Tensão de velocidade}} \quad (2.17)$$

O primeiro termo à direita da eq. 2.17 é proporcional a di/dt e é resultado da variação da corrente. Este termo pode existir mesmo com o sistema estacionário e é comumente definido como *tensão de transformação*. O segundo termo é proporcional à dx/dt , que é a velocidade mecânica da parte móvel. Tal termo é definido como *tensão de velocidade*. Não importa quantos terminais um sistema possua, a tensão nestes terminais será sempre uma combinação destes dois fenômenos.

Se restringirmos o sistema a materiais cuja magnetização apresente comportamento linear com os campos magnéticos, teremos um sistema eletricamente linear e o fluxo concatenado poderá ser expresso em termos de uma indutância L , da seguinte forma:

$$\lambda = L(x) i \quad (2.18)$$

Este sistema é eletricamente linear porque o fluxo concatenado varia linearmente com a corrente. A variação deste fluxo com a geometria, conforme indicado genericamente na eq. 2.17, está incluída na função $L(x)$. Escrevendo a tensão nos terminais em função de $L(x)$, tem-se:

$$v = L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (2.19)$$

Para o caso particular de uma geometria fixa (x constante) o segundo termo na eq. 2.19 se anula de forma que:

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (2.20)$$

que representa a relação entre tensão e corrente convencional na teoria de circuitos.

Esta demonstração foi baseada em Woodson & Melcher 1968. A teoria de modelagem por parâmetros concentrados para o *scanner* baseia-se no modelo descrito, onde as perdas não foram consideradas. Sistemas reais apresentam perdas devido à resistência dos fios e perdas devido aos materiais magnéticos, provenientes da histerese e das correntes parasitas. Embora sejam importantes no projeto e operação dos dispositivos, tais perdas praticamente não influenciam as interações eletromecânicas. Consequentemente, tais perdas são representadas por resistências externas conectadas aos sistemas eletromecânicos acoplados.

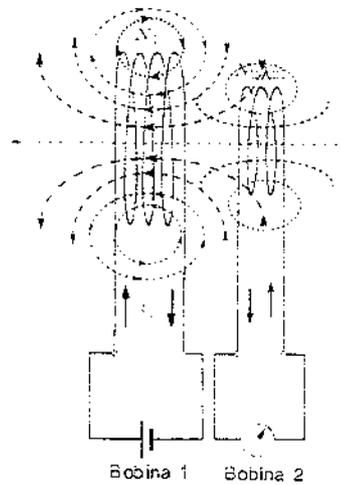


Figura 2.3: Conceito de indutância mútua.^{Halliday 1994} Uma tensão é induzida na bobina 2, a partir da corrente em 1. Parte do fluxo magnético devido a corrente em 1 acopla-se a bobina 2. De maneira similar, parte do fluxo gerado pela corrente induzida em 2 é acoplado pela bobina 1.

Indutância mútua

Suponhamos um sistema composto por dois condutores ideais e estacionários, como mostrado na fig. 2.3, sendo que o primeiro condutor está ligado a uma fonte de corrente e o segundo a um galvanômetro.

A passagem de corrente na bobina 1 produz um fluxo magnético variável no tempo que, de acordo com a lei de indução de Faraday, induz uma tensão na bobina 2. Outro fenômeno acontece, o fluxo magnético devido à corrente na bobina 1 acopla-se à bobina 2, da mesma forma que o fluxo na bobina 2 acopla-se a bobina 1. Define-se o fluxo acoplado mútuo como:

$$\lambda_{21} = M_{21} i_1 \quad (2.21)$$

$$\lambda_{12} = M_{12} i_2 \quad (2.22)$$

$$M_{12} = M_{21} = M \quad (2.23)$$

onde λ_{21} é o fluxo acoplado à bobina 2, proporcional a i_1 , e λ_{12} é o fluxo acoplado à bobina 1, proporcional a i_2 . A constante de proporcionalidade é a chamada indutância mútua.

Assim sendo, considerando-se um sistema eletricamente linear, a tensão nos terminais dos indutores será a somatória de um termo devido à corrente injetada ou direta, e de outro devido à corrente induzida, e poderá ser escrita como:

$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (2.24)$$

$$v_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \quad (2.25)$$

No *scanner* atuado por indução, a bobina 1 representa o enrolamento do estator, e a bobina 2 a armadura, de tal forma que as tensões em seus terminais seja dada por:

$$v_e = L_e \frac{di_e}{dt} + M \frac{di_a}{dt} \quad (2.26)$$

$$v_a = L_a \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_e}{dt} \quad (2.27)$$

A equação para a tensão induzida na armadura do *scanner*, eq. 2.27 será utilizada no modelo por parâmetros concentrados apresentado no próximo capítulo.

2.2.2 A origem das forças

As máquinas elétricas em geral, e os *scanners* oscilantes, em particular, operam com base nas forças de Lorentz, que são forças que surgem em uma partícula carregada devido a dois fatores; presença de um campo elétrico \mathbf{E} , e/ou movimento da partícula em um campo magnético \mathbf{B} . A primeira componente é denominada força elétrica, e a segunda força magnética. Para uma partícula com carga q movendo-se no vácuo à velocidade \mathbf{v} em uma região sujeita aos campos elétrico e magnético, a força de Lorentz é dada por:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.28)$$

A equação 2.28 permanece válida mesmo quando \mathbf{v} aproxima-se da velocidade da luz. As variáveis \mathbf{E} , \mathbf{B} e \mathbf{v} podem variar no tempo-espaço, desde que seja considerado um mesmo sistema de referência.

O termo $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ é chamado força magnética. Por ser perpendicular ao movimento da partícula, a força magnética não pode alterar sua velocidade, ou seja, não pode realizar trabalho.

Vamos supor agora a passagem de uma corrente elétrica por um condutor ideal ($R \rightarrow 0$, $\mathbf{E} \rightarrow 0$ em seu interior), em uma região sujeita a um campo magnético \mathbf{B} , fig. 2.4(a).

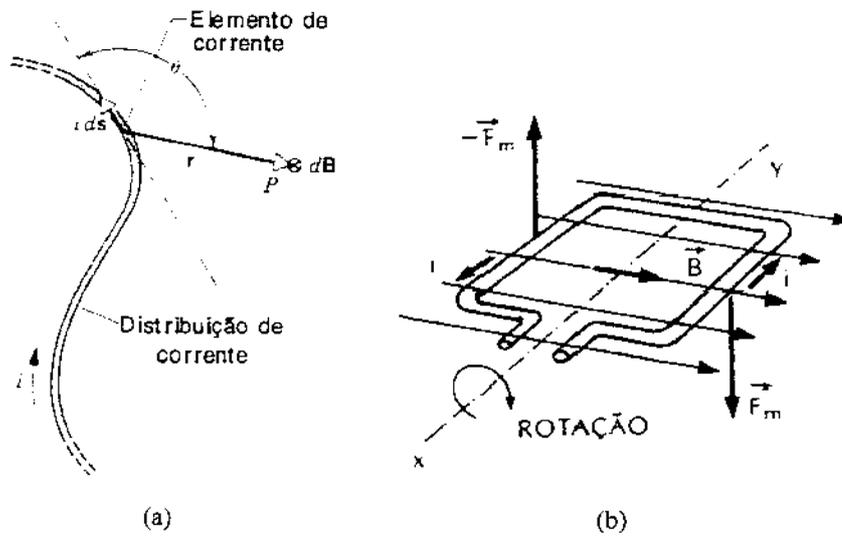


Figura 2.4: Força magnética^{Halliday 1994} gerada em um condutor percorrido por uma corrente i em uma região de campo magnético \mathbf{B}

A força total no condutor é obtida pela integração do componente infinitesimal, $d\mathbf{F}_{mag}$, ao longo do condutor.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_{mag} &= \oint_c d\mathbf{F}_m \\
 d\mathbf{F}_{mag} &= q \frac{d\mathbf{l}}{s} \times \mathbf{B} = i d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \\
 \mathbf{F}_{mag} &= i \oint_c d\mathbf{l} \times \mathbf{B}
 \end{aligned}
 \tag{2.29}$$

Na equação da força magnética em um condutor, eq. 2.29, a corrente i pode ser injetada, como nos dispositivos galvanométricos, ou induzida, como no *scanner* indutivo. O termo $d\mathbf{l}$ relaciona-se à geometria da armadura, e o campo magnético, \mathbf{B} , em nosso caso, é gerado pelos ímãs permanentes.

Para geometrias simples e condutor percorrido por uma corrente $i(t)$, variável no tempo, pode ser demonstrado que a eq. 2.29, reduz-se a:

$$\boxed{F(t) = B_{dc} \cdot l \cdot i(t)}
 \tag{2.30}$$

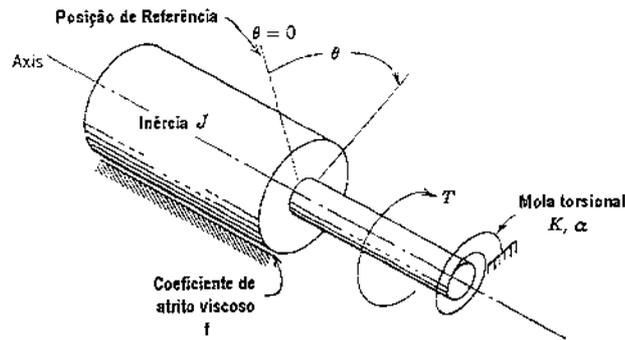


Figura 2.5: Sistema massa-mola torsional. Um corpo, com momento de inércia J em relação ao eixo de rotação está sob a ação de um torque T . Uma mola torsional gera um torque restaurador proporcional à velocidade angular.

onde l é o comprimento do condutor perpendicular ao campo magnético, e \mathbf{B}_{dc} é o campo magnético gerado por ímãs permanentes.

2.2.3 A origem do movimento

Do ponto de vista mecânico o *scanner* é um sistema mecânico torsional, como o visto na fig. 2.5, composto por um componente inercial e uma barra de torção submetidos a um torque e sujeitos ao atrito viscoso com o ar. Sob a ação do torque o sistema sofre uma deformação ϕ , em relação à referência. Considerando que o sistema está em seu regime elástico, ^{Beer & E. Russell Johnston 1985} cessada a ação do torque o sistema volta à posição inicial pela ação do torque restaurador produzido pela torção da barra.

Considerando-se um sistema rígido e desprezando-se a inércia das barras de torção, a equação do movimento para o sistema rotacional submetido a uma força linear restauradora, a uma força de atrito proporcional à sua velocidade e a um torque adicional, $T(t)$, é:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} + k_\theta \theta = T(t) \quad (2.31)$$

Onde J é a inércia, f é o coeficiente de atrito viscoso e k_θ é a constante de rigidez torsional da mola.

Que é a equação de um oscilador harmônico simples torsional. Se o torque $T(t)$ possuir variação senoidal, a eq. 2.31 leva ao fenômeno da ressonância, onde a amplitude se torna muito

grande quando a frequência da força aplicada se iguala à frequência natural do oscilador livre, sem amortecimento.

Supondo um torque externo aplicado senoidal, com frequência ω e fase θ_0 , e supondo que os coeficientes na eq. 2.31 são constantes, chega-se à equação geral para o oscilador subamortecido:

$$\theta(t) = \underbrace{\Theta e^{-\gamma t} \cos(\omega_1 t + \theta_{tran})}_{\text{transiente}} + \underbrace{\frac{T/J}{[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2 \omega^2]^{1/2}} \sin(\omega t + \theta_0 + \beta)}_{\text{estacionário}} \quad (2.32)$$

Onde Θ e θ_{tran} , relacionados ao transiente, são constantes arbitrárias determinadas pelos valores iniciais do ângulo e velocidade em $t = 0$, e as outras constantes são dadas por:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_\theta}{J}} \quad (2.33)$$

$$\gamma = \frac{b}{2J} \quad (2.34)$$

$$\omega_1 = (\omega^2 - \gamma^2)^{1/2} \quad (2.35)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2\gamma\omega} \right] \quad (2.36)$$

O primeiro termo em 2.32 decresce exponencialmente, e é chamado termo transiente e depende das condições iniciais. O segundo termo, que permanece depois que o transiente desaparece, é chamado termo estacionário e não depende das condições iniciais.

Na ressonância $\omega = \omega_0$, e considerando-se apenas o termo estacionário, a eq. 2.32 pode ser simplificada para:

$$\boxed{\theta(t) = \frac{T_0}{2J\gamma\omega_0} \sin(\omega_0 t + \theta_0)} \quad (2.37)$$

que representa o movimento de um oscilador torsional sujeito a um torque senoidal, e a um amortecimento viscoso linear com a velocidade.

A demonstração mais detalhada do equacionamento apresentado neste capítulo poderá ser encontrado em livros como Woodson & Melcher 1968, Symon 1982 e Lorrain 1988. Nos capítulos subsequentes, os parâmetros mecânicos do dispositivo serão particularizados para os *scanners* ressonantes atuados por indução.

2.3 Sumário

Neste capítulo foram apresentados os princípios físicos de funcionamento do *scanner* ressonante atuado por indução. Inicialmente foi apresentada a concepção do dispositivo, e em seguida foram apresentados individualmente os fenômenos físicos presentes em sua concepção: a indução eletromagnética, os conceitos de indutância e indutância generalizada, a origem das forças e a origem do movimento. Mostrou-se que o dispositivo opera de maneira similar a um transformador cujo enrolamento secundário (armadura, no *scanner*), possui liberdade de movimento em torno de um eixo de rotação. Chegou-se a um conjunto de equações que relacionam as propriedades mecânicas da estrutura com o torque gerado através de interações eletromagnéticas. Formas analíticas para o fluxo concatenado e para a tensão induzida na armadura foram obtidas, fundamentais para o estudo de técnicas para aumentar a eficiência do dispositivo. A utilização dos conceitos desenvolvidos neste capítulo em tecnologias para melhoria do desempenho geral do dispositivo serão apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 3

Scanner indutivo com desempenho melhorado

Conforme apresentado no capítulo 1, os principais problemas dos *scanners* indutivos planares existentes atualmente são, do ponto de vista do desempenho, o elevado consumo de potência e a baixa frequência de operação alcançada (em torno de 1 kHz). Do ponto de vista da fabricação, os problemas são a ausência de uma metodologia de projeto e a utilização de processos derivados da microeletrônica, que devido à ausência de uma indústria de Si no país, inviabilizam a fabricação em larga escala dos dispositivos. Neste capítulo serão apresentadas as contribuições deste trabalho para melhorar o desempenho do *scanner* indutivo.

3.1 Melhoria no acoplamento magnético - Atuador fortemente acoplado

Como apresentado no capítulo 2, as forças de Lorentz que atuam no dispositivo provêm da interação entre o campo magnético produzido por um par de ímãs permanentes e a corrente induzida na armadura. Assim sendo, sem alterar as dimensões do dispositivo, pode-se aumentar o torque de duas maneiras:

1. Aumentando-se o campo magnético produzido pelos ímãs permanentes;
2. Aumentando-se a corrente induzida na armadura.

Os ímãs utilizados no dispositivo proposto pertencem à família dos ímãs de NdFeB. Desenvolvidos nos anos 80, esta família apresenta produto força-energia¹ até 5 vezes maiores que os

¹Índice utilizado para medir a *força* do ímã, dado pelo valor máximo do produto entre **B** e **H** na curva de desmagnetização. A unidade do SI utilizada para o produto de energia é o Jm^{-3} .

melhores ímãs de ALNICO disponíveis. Uma desvantagem deste material é a baixa temperatura de Curie² apresentada, tipicamente 310° C.

Uma vez que o campo magnético permanente é o máximo possível, a única maneira de aumentar-se o torque é aumentando-se a corrente induzida na armadura. A corrente na armadura é dada por:

$$i_a(t) = \frac{v_a(t)}{R_a} \quad (3.1)$$

onde v_a , a tensão induzida na armadura, dada pela eq. 2.27:

$$v_a = L_a \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_e}{dt}$$

Substituindo-se a eq. 2.27 na eq. 3.1, tem-se:

$$i_a(t) = \frac{L_a \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_e}{dt}}{R_a} \quad (3.2)$$

onde R_a e L_a correspondem à resistência e indutância da armadura, M é a indutância mútua entre estator-armadura, e i_e é a corrente de entrada no estator.

De acordo com a eq. 3.2, as formas de aumentar a corrente induzida são:

1. Aumentar a indutância da armadura;
2. Aumentar a frequência da corrente aplicada ao estator di_e/dt .
3. Aumentar a indutância mútua;
4. Reduzir a resistência da armadura;

O aumento da indutância da armadura, isoladamente, não seria viável devido às complicações que isso implicaria no processo de fabricação (pelo aumento do número de espiras, por exemplo).

O aumento da frequência da corrente injetada possui duas implicações; primeiramente, esta frequência determina a frequência de operação do dispositivo, constituindo um requerimento do sistema e não um parâmetro de desempenho. Em segundo lugar, o aumento da frequência aumentaria a reatância indutiva do estator, e conseqüentemente o consumo de potência.

²Temperatura na qual o material começa a perder sua magnetização.

Os dois últimos itens, aumento da indutância mútua e redução da resistência da armadura são os mais viáveis do ponto de vista de fabricação e foram utilizados para melhorar o desempenho do *scanner* indutivo.

A redução na resistência da armadura, ligada aos processos de fabricação foi implementada através do aumento de sua espessura ou utilização de estruturas metálicas para o rotor, como será explicado no capítulo seguinte.

A indutância mútua pode ser entendida fisicamente como a relação entre o fluxo magnético gerado pelo estator que passa pela armadura (fluxo acoplado) e a corrente no estator. Matematicamente:

$$M = \frac{\lambda_{ae}}{i_e} \quad (3.3)$$

Quanto maior o fluxo acoplado, sem aumento correspondente da corrente de estator, maior a indutância mútua, ou seja, maior o acoplamento magnético entre estator e armadura, e conseqüentemente melhor o desempenho do dispositivo.

A fig. 3.1 o mostra o estator e a armadura do *scanner* fracamente acoplado, e a distribuição do campo magnético no dispositivo, obtido através de uma simulação por elementos finitos. Pela figura observa-se uma maior densidade de campo (setas mais escuras na figura) numa região externa à armadura do dispositivo. A armadura é envolvida apenas por uma pequena parcela do campo magnético total gerado pelas bobinas do estator, o que implica em desperdício de energia. Maiores detalhes sobre as simulações serão fornecidos no capítulo 5.

O desperdício de energia causado pela geometria do dispositivo, em especial pelo entreferro existente, motivou a busca por uma forma de aumentar-se o fluxo acoplado à armadura. A solução baseou-se numa idéia já explorada no *scanner* da fig. 1.9(a), e que foi adaptada ao nosso problema de forma que os dispositivos fossem planares e pudessem ser fabricados em lotes.

A solução foi o confinamento do fluxo em um núcleo ferromagnético que passasse por entre a armadura, que precisaria estar sobre um rotor perfurado. O novo desenho do dispositivo, com atuador fortemente acoplado, é mostrado na fig. 3.2. Esta figura apresenta o resultado de uma simulação do perfil do campo magnético gerado pelo dispositivo. Observa-se que a maior densidade de campo localiza-se no interior da armadura (setas mais escuras na figura). Os dois vórtices localizados nos cantos superiores da figura devem-se a inclusão dos ímãs permanentes na simulação.

Para o circuito de atuação com entreferro, considerando-se que a relutância magnética do ar é muito maior que a do material ferromagnético do núcleo, podemos supor que toda a força magneto-

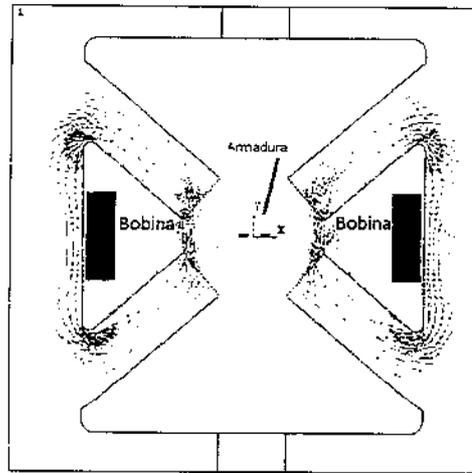


Figura 3.1: Atuador fracamente acoplado e campo magnético simulado por elementos finitos. Observe que a densidade do campo magnético, B , é maior (região mais escura no gráfico) numa região externa à armadura, o que implica em desperdício de energia.

motriz gerada pela bobina de atuação está aplicada no entreferro. O fluxo magnético que atravessa a armadura pode então ser aproximado por:

$$\lambda_{a1} = \kappa_1 \cdot \frac{B}{A_a} \quad (3.4)$$

onde B é a densidade de fluxo magnético, em Tesla, A_a é a área da armadura, e κ é uma constante de acoplamento que varia entre 1, para um acoplamento total e 0, para nenhum acoplamento.

No ar, a relação entre B e H pode ser aproximada por³ $B = \mu_0 H$, e $H = Ni$ é a intensidade de campo, dada pelo produto entre a corrente no estator, i e o número de espiras do enrolamento, N . Assim sendo, o fluxo magnético aproximado que atravessa a armadura será dado por:

$$\lambda_{a1} = \kappa_1 \cdot \frac{\mu_0 N i_e}{A_a} \quad (3.5)$$

Para a geometria mostrada na fig. 3.1 o acoplamento é pequeno, logo $\kappa_1 \ll 1$.

O fluxo que atravessa a bobina no atuador fortemente acoplado é calculado por:

$$\lambda_{a2} = \kappa_2 \cdot \frac{B}{A_a} \quad (3.6)$$

³Os valores da permeabilidade magnética no vácuo μ_0 e no ar possuem valores bem próximos, de forma que esta aproximação não representa um erro significativo neste caso.

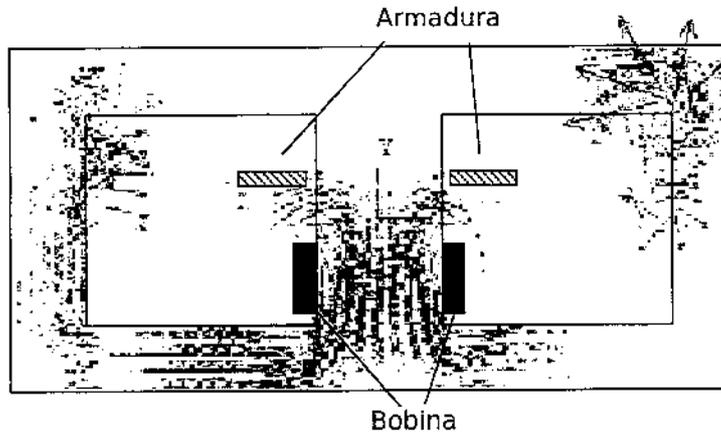


Figura 3.2: Atuador fortemente acoplado e campo magnético simulado por elementos finitos. Observe que a maior parte do fluxo magnético atravessa a bobina da armadura (setas mais escuras na figura).

Entretanto, nesta geometria, o fluxo magnético está confinado ao caminho magnético formado pelo núcleo. Desta forma $\kappa_2 \approx 1$. A densidade de campo magnético na região da bobina neste caso é dada por:

$$B = \mu_r \mu_0 H = \mu_r \mu_0 Ni \quad (3.7)$$

Substituindo-se 3.7 em 3.6 obtém-se uma equação para o fluxo magnético através da armadura:

$$\lambda_{a2} = \kappa_2 \cdot \frac{\mu_r \mu_0 Ni}{A_a} \quad (3.8)$$

onde μ_r é a permeabilidade relativa do material do núcleo magnético. Comparando-se os valores de λ_{a1} e λ_{a2} , tem-se:

$$\frac{\lambda_{a2}}{\lambda_{a1}} = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \mu_r \approx \frac{\mu_r}{\kappa_1} \quad (3.9)$$

Na eq. 3.9, $\kappa_1 \ll 1$, tipicamente $\kappa_1 \approx 10^{-8}$, Ferreira 1998 e μ_r pode chegar a 10^4 , Smith 1985 para alguns materiais, de forma que o fluxo acoplado para o scanner com atuador fortemente acoplado será muito maior que o fluxo para o núcleo com entreferro.

3.2 *Scanner* com duplo rotor

O aumento da frequência de operação do *scanner* ressoante e de seu ângulo de deflexão são necessidades conflitantes pois, ao mesmo tempo que a frequência é proporcional à rigidez torsional da estrutura, eq. 2.33, a deflexão é inversamente proporcional, eq. 2.37.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\kappa_T}{J}}$$
$$\theta = \frac{T_0}{2J\gamma\omega_0}$$

Assim sendo, com base nas equações 2.33 e 2.37, pelo menos três maneiras podem ser utilizadas para solucionar este conflito:

1. Aumento no torque indutivo proporcionado pelo mecanismo de atuação;
2. Redução no momento de inércia do espelho;
3. Aumento no fator de qualidade da estrutura.

O aumento no torque é proporcionado por melhorias no mecanismo de atuação, através da implementação do circuito magnético sem entreferro, conforme descrito anteriormente.

A redução no momento de inércia do espelho pode ser obtida alterando-se a inércia do espelho. Uma forma de conseguir este efeito é através de redução em sua massa causada por perfurações estrategicamente posicionadas nas costas do espelho. Entretanto, isso altera a rigidez do espelho e pode alterar a qualidade óptica da estrutura.

O fator de qualidade da estrutura pode ser melhorado através de um projeto ótimo das barras de torção,^{Miyajima 2005} visando a garantia de um comportamento linear em toda faixa de deflexão. A redução das perdas devido ao atrito viscoso com o ar, através de um encapsulamento em vácuo, é outra alternativa para melhorar a qualidade.

Conciliar todos estes requerimentos em uma mesma estrutura é difícil, senão impossível, de ser implementado e aliado à fabricação do dispositivo. A solução encontrada foi a separação entre os mecanismos de atuação (armadura) e reflexão (espelho), na estrutura do dispositivo, como mostrado na fig. 3.3.

A separação entre as funções do dispositivo possibilita um projeto independente e particularizado de cada uma destas funções, visando o aumento da frequência de operação e ângulo de

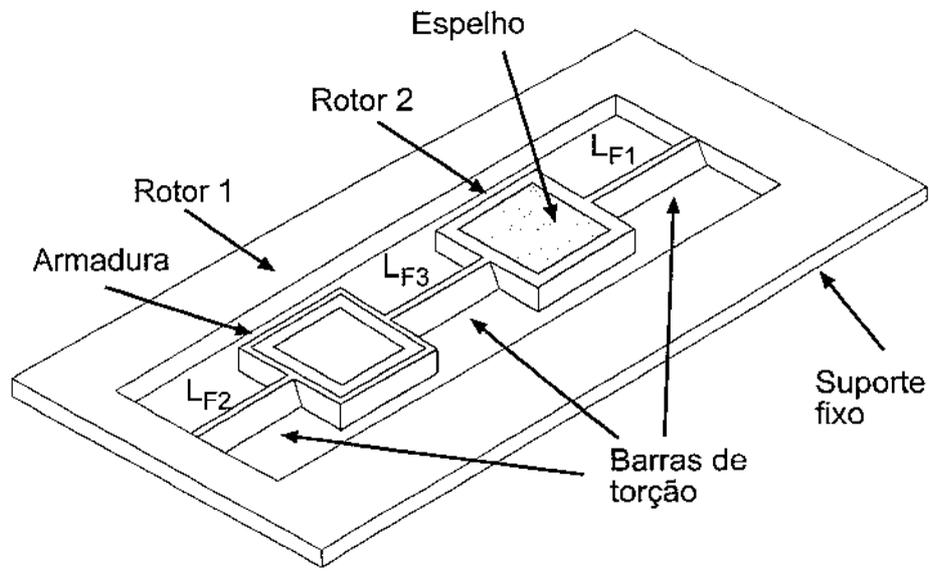


Figura 3.3: *Scanner* com duplo rotor. A separação entre espelho e armadura possibilita o projeto independente e particularizado de cada uma destas funções.

deflexão. A adoção do duplo rotor proporciona uma vantagem adicional, a redução da deformação do espelho devido ao aquecimento da armadura pela passagem de corrente.

Do ponto de vista da dinâmica do dispositivo, o duplo rotor dificulta o projeto, pois outros modos, que não os puramente torsionais, são inseridos na estrutura, e devem ser separados do modo principal de operação através de um projeto mais cuidadoso do dispositivo.

3.3 Sumário

Neste capítulo foram apresentadas e justificadas as contribuições propostas para melhoria no desempenho do *scanner* indutivo. Primeiramente foi apresentado o mecanismo de atuação fortemente acoplado, que possibilitou que a maior parte do campo magnético gerado fosse acoplado à armadura, o que representa uma redução significativa no desperdício de energia, conforme comprovado pelo equacionamento apresentado. Em seguida, foi proposta a geometria do *scanner* com duplo rotor, que possibilitou a separação entre os mecanismos de atuação (armadura) e reflexão (espelho), de forma que estas funções pudessem ser melhoradas separadamente, uma vez que os requerimentos de cada uma são conflitantes com as necessidades globais do dispositivo: maior frequência de operação e ângulo de deflexão. Outra vantagem da geometria proposta é a potencial redução dos efeitos provocados pela dissipação de potência gerada na armadura pela passagem da corrente, em especial a distorção do espelho. No capítulo seguinte serão apresentadas as contribuições relacionadas aos materiais e processos empregados para viabilização da fabricação dos *scanners*.

Capítulo 4

Materiais e processos de fabricação

Neste capítulo serão apresentados os materiais e processos empregados na fabricação dos *scanners* indutivos ressonantes. Inicialmente será feita uma revisão do processo Si-LIG, desenvolvido por Barbaroto, seguido por uma análise crítica de suas vantagens e desvantagens. Em seguida será feita a apresentação do bronze-fosforoso como material estrutural, e do processo de fabricação utilizado.

4.1 Processo Si-LIG^{Barbaroto 2003}

O processo Si-LIG, que significa Litografia e Eletroformação sobre substrato de Silício, foi desenvolvido por Barbaroto,^{Barbaroto 2002, Barbaroto 2003} e une a litografia profunda e eletrofomaração de metal, derivados da tecnologia LIGA, à microusinagem química de substratos de Si em solução aquosa de KOH (Hidróxido de potássio).

Como mostrado anteriormente, o torque indutivo pode ser aumentado reduzindo-se a resistência da armadura, através de um aumento na espessura do metal. Uma maneira de aumentar a espessura de estruturas metálicas é através de deposição eletroquímica, também conhecida como eletroformação.^{Madou 1997}

A eletroformação ocorre em uma célula eletrolítica, através de uma reação química induzida pela passagem de uma corrente elétrica pela solução eletrolítica, rica no metal que se quer depositar. Os íons liberados na solução pela passagem da corrente são atraídos pelo potencial elétrico no cátodo, que está ligado às estruturas que se deseja eletroformar. A espessura do metal a ser depositado depende de fatores como a corrente elétrica, o tempo, e a massa molar do metal a ser

depositado, entre outros. O padrão formado pelas estruturas eletroformadas segue o de máscara isolante depositada anteriormente à eletroformação.

As principais etapas do processo são:

Litografia profunda de UV Por meio deste processo são abertas as janelas no foto-resiste correspondente a estrutura que se quer eletroformar;

Eletroformação do metal Neste processo, as bobinas, definidas pelas janelas no foto-resiste são eletroformadas;

Microusinagem química A lâmina de Si é submetida a um processo de corrosão anisotrópica^{Seidel 1990, Seidel 1990} para formação da estrutura do *scanner*.

Na fig.4.1 está representado o processo Si-LIG. Maiores detalhes podem ser encontrados na bibliografia referenciada.^{Barbaroto 2002, Barbaroto 2003}

Os dispositivos fabricados por este processo são mostrados na fig.1.10(b).

4.1.1 Vantagens e desvantagens do processo Si-LIG

O processo Si-LIG mostrou-se bastante satisfatório para a fabricação dos *scanners* indutivos propostos por Ferreira. Baseado em tecnologias derivadas da microeletrônica, o processo possibilita a fabricação em lotes dos dispositivos, com excelente repetibilidade e confiabilidade.

Entretanto, como neste trabalho propôs-se a viabilização de fabricação dos dispositivos fora do ambiente acadêmico e no país, algumas observações devem ser feitas. Primeiramente, os investimentos elevadíssimos necessários para a compra de equipamentos para realização dos processos de fabricação, fornos, alinhadores, foto-gravadoras, entre outros. Seria necessário a montagem de uma pequena *foundry*¹ em território nacional, o que seria inviável do ponto de vista econômico. Outro ponto diz respeito a utilização do Si como material estrutural, que apesar de suas excelentes propriedades mecânicas,^{Petersen 1980} seria inviável para fabricação dos *scanners* no país, devido à ausência de fornecedores de lâminas de Si em território nacional. Este material precisaria ser importado a elevado custo, o que deixaria o dispositivo menos competitivo do ponto de vista de mercado.

¹Empresa especializada em processos de fabricação de microeletrônica e MEMS, que fabrica lotes de dispositivos sobre encomenda.

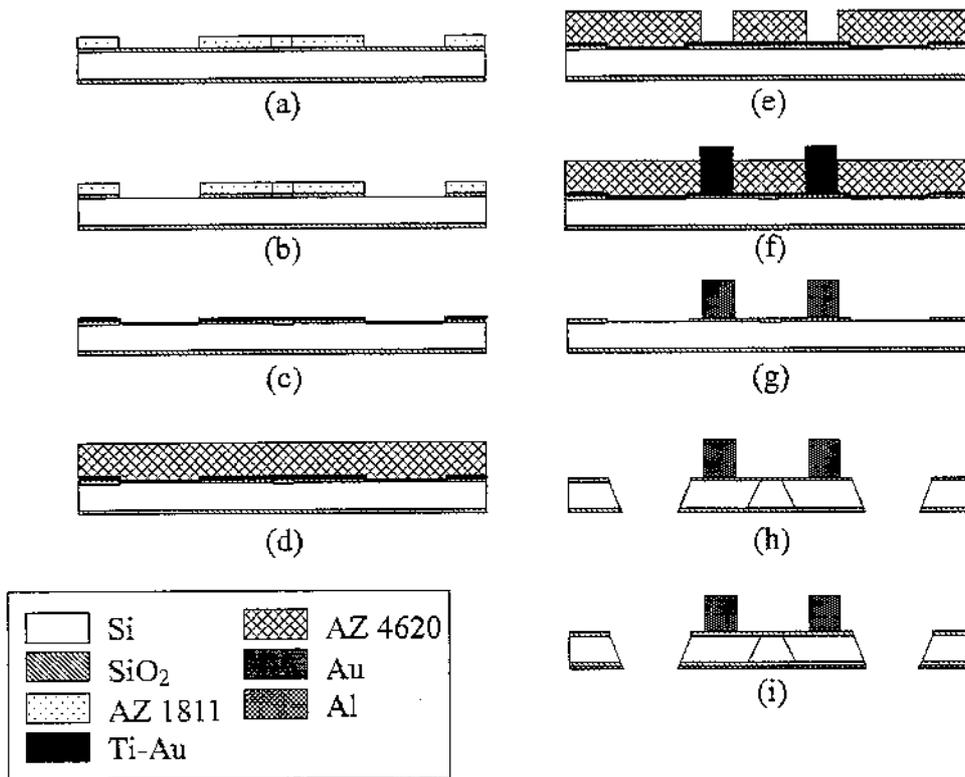


Figura 4.1: Processo Si-LIG. ^{Barbaroto 2002} (a) Fotogravação do primeiro nível, (b) Abertura das janelas no SiO_2 , (c) Deposição da camada semente de 2000 de Ti-Au, (d) Deposição do foto-resiste espesso AZ4620, (e) Fotogravação (f) Eletroformação de Au, (g) Remoção do foto-resiste e limpeza, (h) Formação da estrutura mecânica por corrosão anisotrópica com KOH, (i) Deposição do Al nas costas do dispositivo para formação do espelho.

4.2 Fotofabricação em bronze-fosforoso^{Madou 1997}

A foto-fabricação é um processo de usinagem foto-química, PCM - *Photo-Chemical Machining*, similar ao processo de foto-litografia^{Jaeger 1993} utilizado em microeletrônica. Este processo é conhecido por sua precisão e baixo custo, sendo utilizado para usinagem de folhas e lâminas de metais, ou gravação em vidros foto-sensíveis. Amplamente empregado na indústria eletrônica e aeroespacial, é utilizado para produção de máscaras de solda, telas para montagem de SMDs², *Surface Mounted Devices*, atenuadores ópticos, discos de encoders, dentre outras aplicações.

A primeira etapa do processo é a produção de uma máscara de alta resolução com a geometria a ser usinada. Em seguida aplica-se um polímero sensível à radiação UV, (foto-resiste), na lâmina que será usinada. Feito isso, a lâmina é exposta através da máscara (processo de foto-litografia), de forma que após a revelação do foto-resiste exposto, uma imagem idêntica à máscara ficará gravada no metal. Finalmente, realiza-se a corrosão química das áreas expostas no processo de revelação, para formação das peças.

As principais vantagens da foto-fabricação são:

- Liberdade total no projeto de componentes planares;
- Peças totalmente isentas de rebarbas;
- Baixos custos de produção;
- Não alteração das características do metal;
- Dispensa de gastos com ferramental;
- Possibilidade de trabalho em metais temperados;
- A peça usinada quimicamente não sofre *stress*, por isso não precisa nenhum tratamento térmico após o processo.

A espessura máxima das lâminas que podem ser usinadas chega a 2,0mm, e a maior limitação é impossibilidade de abertura de furos com diâmetro menor que a espessura do metal.

As características técnicas, aliadas às vantagens do processo de foto-fabricação, como liberdade de geometrias, o baixo custo de produção, sua disponibilidade em território nacional, e a possibilidade de usinagem de peças em bronze-fosforoso sem a necessidade de tratamento térmico

²SMD's são componentes eletrônicos, resistores, capacitores, circuitos integrados, miniaturizados para montagem em equipamentos que requerem alta densidade de componentes por *cm*².

após o processo, foram os fatores determinantes na escolha da foto-gravação como processo adequado para produção dos *scanners* indutivos planares, em substituição aos processos derivados da microeletrônica.

Maiores detalhes sobre o processo podem ser encontrados na literatura referenciada, em especial em Madou 1997.

4.3 Bronze-fosforoso - LIGA UNS C52100

Buscando a resposta sobre como produzir os *scanners* no país utilizando materiais e processos disponíveis localmente, pensou-se primeiramente no aço, devido à tradição na utilização deste material e suas excelentes propriedades mecânicas. Entretanto, a presença de Ferro em sua composição, ocasionaria a atração da estrutura pelos ímãs permanentes gerando uma pré-tensão indesejada.

O material para fabricação dos *scanners* deveria ter as seguintes propriedades:

- Excelentes propriedades mecânicas;
- Resistência à fadiga;
- Ausência de Ferro, ou outros materiais ferromagnéticos, em sua composição;
- Disponibilidade em território nacional;
- Disponibilidade de processos de usinagem no país.

Após pesquisas, o material escolhido foi a liga de bronze-fosforoso, conhecida tecnicamente como liga 521, e que possui utilização como molas em dispositivos de precisão como galvanômetros, além de possuir excelentes propriedades mecânicas e resistência à fadiga.

O estanho é adicionado ao Cobre para formar uma liga com elevada resistência à fadiga. Este grupo é conhecido como Bronze-fosforoso em razão do Fósforo que é adicionado para desoxidação pela eliminação do Oxigênio da liga. Quanto maior o teor de Estanho, maior será a resistência mecânica e o efeito mola. De acordo com a nomenclatura UNS, *Unified Numbering System*, o Bronze-fosforoso utilizado neste trabalho, cuja composição é 8,0% de Estanho, 0,15% de Fósforo e o restante de Cobre, é designado pelo número UNS C521000.

Na tab. 4.1 são comparadas as propriedades mecânicas do Silício monocristalino, aço e Bronze-fosforoso. Esta comparação é feita com base em uma série de coeficientes que relacionam as propriedades mecânicas dos materiais, da forma que elas se relacionam nas equações dos modos de

vibração, deformação mecânica e tensão na barra de torção. Conforme o procedimento empregado por Urey 2002.

A partir deste procedimento conclui-se que se um *scanner* com as mesmas dimensões fosse fabricado em Si, aço e Bronze-fosforoso, o dispositivo em Si apresentaria uma frequência de ressonância do modo torsional 50% maior, uma frequência de ressonância para os outros modos 46% maior (maior separação entre os modos), cerca de 1/4 da deformação mecânica de um espelho de Bronze-fosforoso. Entretanto, o dispositivo em Bronze-fosforoso apresentaria um ângulo de deflexão cerca de 12% maior, no limite de ruptura das barras de torção em relação ao Si.

Tabela 4.1: COMPARAÇÃO ENTRE MATERIAIS ESTRUTURAIS

		Silício ^a <100>	Aço 1010 ^a 1010	Bronze fosforoso ^a UNS C52100
Módulo de Young (E)	E (Pa)	1.12×10^{11}	2.03×10^{11}	1.10×10^{11}
Constante de Rigidez (G)	G (Pa)	5.1×10^{10}	7.85×10^{10}	4.1×10^{10}
Constante de Poisson (ν)		0.28	0.24	0.34
Densidade	ρ (Kgm ⁻³)	2330	7800	8800
Tensão de ruptura	Sy (Pa)	6.90×10^8	8.8×10^8	7.25×10^8
Coef. de ressonância torsional ^b (maior melhor)	$(G/\rho)^{0.5}$	4340.95	3172.4	2158.87
Coef. de ressonância não torsional ^b (maior melhor)	$(E/\rho)^{0.5}$	6945.53	5101.53	3755.34
Coef. de deformação dinâmica ^c (menor melhor)	ρ/E	2.07×10^{-8}	1.84×10^{-8}	8×10^{-8}
Coef. de tensão na barra de torção ^d (maior melhor)	Sy/G	1.57×10^{-2}	1.02×10^{-2}	1.77×10^{-2}

^a<http://www.matweb.com/>

^bDefinido na seção 5.2.3.

^cObtido a partir da equação para a máxima deformação dinâmica de um espelho proposta por Brosens^{Brosens 1972}

^dObtido a partir da equação para a máxima tensão em uma seção retangular.^{Roark & Young 1989}

Tais parâmetros mostram a superioridade do Si em relação ao Bronze-fosforoso como material estrutural. Apesar disso, os dispositivos em Bronze-fosforoso poderiam facilmente ser fabricados no país, a um custo competitivo e com desempenho satisfatório para a maioria das aplicações.

O aço apresenta propriedades mecânicas intermediárias entre o Silício e o Bronze-fosforoso, entretanto, ele não pode ser utilizado nesta aplicação devido à existência de Ferro em sua composição. Na presença dos campos magnéticos o Ferro se magnetizaria e seriam geradas forças que influenciariam no funcionamento do dispositivo.

Os *scanners* em Bronze-fosforoso podem ser fabricados através de usinagem química, também conhecida como foto-fabricação,^{Madou 1997} um processo comum no país e utilizado, por exemplo,

na indústria gráfica.

4.4 Bronze-fosforoso versus Silício

Como nesta tese propõe-se a substituição do Si pelo Bronze-fosforoso visando a viabilização da fabricação em território nacional, é importante que as diferenças entre os dois materiais seja enfatizada. A tab. 4.2, é apresentado um resumo comparativo das propriedades destes dois materiais, importantes para os *scanners* indutivos.

Tabela 4.2: TABELA COMPARATIVA SI VS. BRONZE-FOSFOROSO

			SI	BRONZE-FOSFOROSO
MÓDULO DE YOUNG	E	GPa	112	110
CONSTANTE DE RIGIDEZ	G	GPa	51	41
MÓDULO DE POISSON	ν		0.28	0.34
DENSIDADE	ρ	Kgm ⁻³	2330	8800
TENSÃO DE RUPTURA	S_y	MPa	690	725
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	σ	$\Omega.cm$	1.00×10^{-2}	1.33×10^{-5}

Observando-se as tab. 4.1 e 4.2 pode-se chegar a conclusão que, apesar do Si apresentar melhores propriedades mecânicas em relação ao Bronze-fosforoso, sua condutividade elétrica é cerca de 1000 vezes menor. Esta relação é importante para os *scanners* indutivos pois, a elevada condutividade possibilita a incorporação da armadura à estrutura do dispositivo sem necessidade de processos adicionais, o que simplifica o processo de fabricação e melhora a relação custo-benefício para os dispositivos em Bronze-fosforoso.

4.5 Sumário

Neste capítulo foram feitas considerações sobre os materiais e processos empregados na fabricação dos *scanners* ressonantes atuados por indução. Inicialmente foi apresentado o processo Si-LIG, que alia etapas do processo de litografia, com etapas provenientes da tecnologia LIGA. Mostrou-se que, apesar do processo Si-LIG ser adequado para produção em lotes dos dispositivos, sua implementação na indústria seria extremamente dispendiosa para os padrões nacionais, devido ao elevado custo dos equipamentos utilizados, e a inexistência de uma indústria do Si no país. Como alternativa ao processo Si-LIG, propôs-se a utilização do processo de foto-fabricação, e como alternativa ao Si a utilização do Bronze-fosforoso como material estrutural. O Bronze-fosforoso, conhecido por sua resistência à fadiga e por suas excelentes propriedades mecânicas, apresenta uma vantagem adicional importante com relação aos *scanners* indutivos: sua elevada condutividade elétrica, que possibilita a incorporação da armadura à estrutura do dispositivo, simplificando o processo de fabricação e montagem e reduzindo os custos de produção do dispositivo. A combinação do processo de foto-fabricação com a utilização do Bronze-fosforoso como material estrutural foi apresentada como uma alternativa viável para substituição do processo Si-LIG. A seguir serão apresentados os os modelos desenvolvidos para o *scanner* indutivo visando o desenvolvimento de uma metodologia de projeto.

Capítulo 5

Modelagem

O *scanner* indutivo é um dispositivo eletromecânico complexo na qual ocorre a interação entre vários domínios físicos. Nesta tese serão considerados apenas três: o domínio estrutural, o eletromagnético e fluídico, fig. 5.1. O domínio estrutural compreende os mecanismos relacionados ao movimento do *scanner* e às deformações estruturais do dispositivo. O eletromagnético é responsável pela conversão da energia elétrica no torque que atuará o dispositivo, e o fluídico compreende o movimento da estrutura em um meio viscoso. A tab. 5.1 apresenta as leis que regem cada um dos domínios e as variáveis de projeto e de desempenho relacionadas a cada um destes domínios.

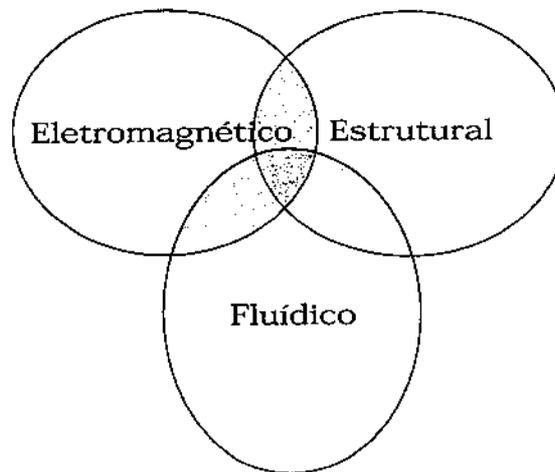


Figura 5.1: Três domínios físicos; estrutural, eletromagnético e fluídico, considerados na modelagem do *scanner*.

O desenvolvimento de uma metodologia de projeto para os dispositivos indutivos aqui apre-

Tabela 5.1: DOMÍNIOS FÍSICOS E VARIÁVEIS RELACIONADAS.

DOMÍNIOS FÍSICOS	LEIS QUE REGEM O COMPORTAMENTO	VARIÁVEL DE PROJETO INFLUENCIADA	PARÂMETROS DE DESEMPENHO
ESTRUTURAL	Leis de Newton Teoria da elasticidade	Dimensões da estrutura	f_r, θ_r, Q
ELETROMAGNÉTICO	Equações de Maxwell Relações constitutivas	Dimensões do atuador, enrolamento bobinas	T_i, Q
FLUÍDICO	Navier-Stockes	Empacotamento	f, Q

sentados constitui uma contribuição na área, uma vez que, embora existam modelos isolados sobre os diferentes fenômenos físicos envolvidos, não havia sido proposta uma sistemática para o projeto dos *scanners* indutivos a partir das especificações de operação.

A elaboração desta sistemática requisitou a contribuição em diferentes modelos visando preencher lacunas existentes no modelamento de tais dispositivos. A tab. 5.2 apresenta uma visão global das diferentes abordagens utilizadas na modelagem do dispositivo, e como estas abordagens foram organizadas neste trabalho.

Os modelos mecânico e elétrico foram inicialmente tratados de maneira isolada, sendo posteriormente agrupados nos modelos eletromecânicos equivalentes para representar o dispositivo como um todo.

Nos modelos eletromecânicos, a interdependência entre as variáveis elétricas e mecânicas foram descritas e as funções de transferência para os dispositivos foram geradas.

Os modelos por elementos finitos foram propostos para melhorar a previsão dos modelos elétrico e mecânico, de forma que as geometrias complexas do dispositivo pudessem ser retratadas no modelo.

Neste ponto, deve-se observar que o modelo fluído-estrutural, onde seriam avaliados os fatores que influenciam diretamente o fator de qualidade da estrutura¹, Q , não foi tratado neste trabalho. O fator de qualidade do dispositivo é uma complexa combinação de fenômenos elétricos, mecânicos e fluidicos. O estabelecimento de modelos e metodologias para determinação do fator de qualidade do dispositivo em diferentes condições de operação consiste em um estudo a parte, e fugiria dos objetivos deste trabalho. Optou-se neste trabalho por apresentar-se quais fenômenos influenciam o Q do dispositivo, e como dá-se esta influência. Nos modelos propostos, o fator de qualidade é extraído a partir de resultados experimentais obtidos em dispositivos semelhantes caracterizados

¹Fator de qualidade pode ser definido como a relação entre a energia armazenada e a energia dissipada em um ciclo de operação de um sistema. Em sistemas mecânicos, como o abordado nesta tese, o fator de qualidade é a relação entre a energia armazenada sob a forma de energia potencial, nos elementos elásticos, e cinética, nos elementos inerciais, dividido pela energia dissipada na forma de atrito.

em condições de operação similares.

Em resumo, os modelos apresentados neste capítulo devem:

- Prever os parâmetros de operação do dispositivo: frequência, amplitude e fator de qualidade;
- Prever seu comportamento dinâmico: modos de vibração da estrutura;
- Permitir a análise de como a geometria do dispositivo, materiais utilizados e parâmetros de fabricação, influenciam o desempenho;
- Permitir a análise dos fenômenos eletromagnéticos e mecânicos e da interação entre ambos;
- Possibilitar o desenvolvimento de uma metodologia de projeto.

Neste capítulo serão apresentados os modelos analíticos e numéricos para os diferentes domínios físicos envolvidos no funcionamento do *scanner*. Este capítulo está organizado da seguinte forma: inicialmente será apresentada uma visão geral da metodologia de projeto proposta, em seguida serão apresentados os modelos analíticos, por elementos finitos e por parâmetros concentrados utilizados na metodologia. Por fim, será apresentada a seqüência dos procedimentos de projeto.

Tabela 5.2: ORGANIZAÇÃO DOS MODELOS PROPOSTOS PARA O *scanner* INDUTIVO.

MODELO ELETROMECAÂNICO (Seção 5.4)				
MODELO ELETROMECAÂNICO 1 ROTOR (Seção 5.4.1)		MODELO ELETROMECAÂNICO 2 ROTORES (Seção 5.4.2)		
MODELO MECÂNICO (Seção 5.2)		MODELO ELÉTRICO (Seção 5.3)		
Fortemente Acoplado (Seção 5.3.2)	Fracamente Acoplado (Seção 5.3.1)	Modal (Seção 5.2.2)	Dinamico 1rotor (Seção 5.2.5)	Dinamico 2 rotores (Seção 5.2.7)
MODELO ELEMENTOS FINITOS (Seção 5.5)				
MODELO ELEMENTOS FINITOS ELÉTRICO (Seção 5.5.2)		MODELO ELEMENTOS FINITOS ESTRUTURAL (Seção 5.5.1)		

5.1 Metodologia de projeto

A metodologia de projeto aqui descrita deve permitir a um engenheiro o dimensionamento do componentes estrutural e eletromagnético do *scanner* para satisfazer um conjunto de especificações técnicas previamente estabelecidas para sua operação.

As especificações principais para o *scanner* indutivo são mostradas na tab. 5.3. O tamanho do espelho, da ordem de alguns milímetros, é compatível com o tamanho característico do feixe de luz nas aplicações de interesse, leitores de código de barras e microscópios confocais. A frequência de ressonância determina a velocidade de varredura do feixe, podendo variar de poucos Hertz até 16 kHz em sistemas de varredura XY utilizados para formação de imagens. O ângulo de deflexão óptico pico-a-pico² estabelece a abertura do feixe. Quanto maior a deflexão óptica, maior o número de elementos possíveis em uma linha de varredura, isto é, maior a resolução do sistema. A qualidade óptica do feixe defletido é função da deformação dinâmica do espelho.^{Brosens 1972, Urey 2002} Em sistemas ópticos típicos, a máxima deformação permitida para evitar aberrações situa-se entre 20 nm e 50 nm.^{Urey 2005}

Tabela 5.3: RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS FÍSICOS E PARÂMETROS DE DESEMPENHO DOS *scanners* INDUTIVOS

PARÂMETROS FÍSICOS	PARÂMETROS DE DESEMPENHO
TAMANHO DO ESPELHO	Tamanho do feixe utilizado
FREQÜÊNCIA DE RESSONÂNCIA	Velocidade de varredura
ÂNGULO DE DEFLEXÃO ÓPTICO	Resolução do sistema
PLANICIDADE DO ESPELHO	Qualidade óptica do feixe defletido

A partir das especificações, obtém-se, segundo os modelos analíticos do dispositivo, os valores iniciais para a geometria que serão introduzidos nos modelos estrutural, eletromagnético e por elementos finitos. A partir daí, refina-se os modelos por elementos finitos para obtenção da geometria definitiva, que será utilizada na fabricação do dispositivo.

A seqüência proposta de procedimentos para projeto dos *scanners* indutivos está enumerada a seguir.

1. Especificar o dispositivo;
2. Dimensionamento a partir do modelo analítico;
3. Modelo por elementos finitos;

²O ângulo de deflexão óptico é definido como 2 vezes o ângulo de deflexão mecânico da estrutura.

4. Ajuste dos parâmetros do modelo FEM;

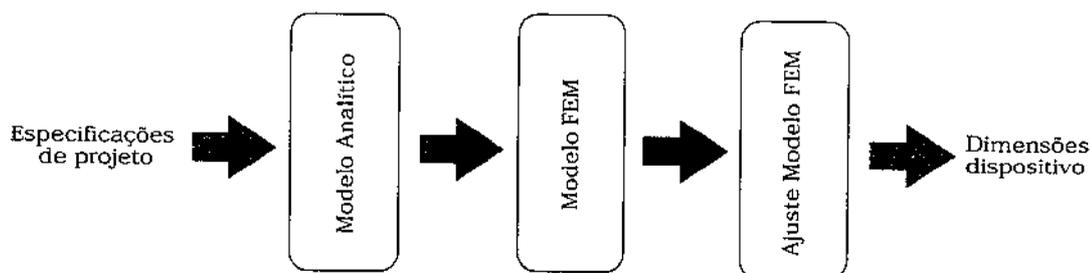


Figura 5.2: Metodologia de projeto.

A seguir serão apresentados os modelos desenvolvidos neste trabalho visando o estabelecimento de uma metodologia de projeto. Primeiramente serão apresentados os modelos dos diferentes domínios físicos que serão posteriormente reunidos no modelo eletromecânico equivalente utilizado para o dimensionamento inicial do dispositivo.

5.2 Modelo Mecânico

Os modelos analíticos foram desenvolvidos com base nas equações diferenciais que regem o comportamento do dispositivo. Embora muitas vezes os resultados obtidos por este método não possam ser diretamente aplicados em dispositivos reais, devido às hipóteses simplificadoras utilizadas, tais modelos são fundamentais para a visualização e o entendimento do funcionamento do dispositivo.

Nesta seção será apresentado o modelo mecânico-estrutural do dispositivo em seus diferentes aspectos. Inicialmente será abordada a deformação da estrutura sujeita a diferentes carregamentos e que dá origem aos seus diferentes modos de vibração. Em seguida, serão apresentados os fatores que influenciam o comportamento dinâmico da estrutura com um e dois rotores com relação ao modo torsional, que é o modo de interesse neste tipo de dispositivo.

5.2.1 Convenções sobre a geometria do scanner

Antes de iniciar a análise dos modos de vibração do *scanner*, é importante que os parâmetros geométricos sejam definidos. Nesta análise o *scanner* será considerado um bloco retangular, com duas barras de torção, como mostrado na fig. 5.3. O comprimento, largura e espessura do bloco são dadas por L_m , D e t_m , respectivamente. As barras de torção possuem comprimento L_f , largura w_f e espessura t_f . Em todos os dispositivos abordados neste trabalho, a espessura do espelho e das barras de torção serão iguais, ou seja $t_m = t_f = t$, onde t será a espessura do substrato.

Em alguns cálculos serão utilizadas as variáveis a e b , que representam, respectivamente, metade da largura e da espessura da barra de torção, $w_f = 2a$, e $t = 2b$.

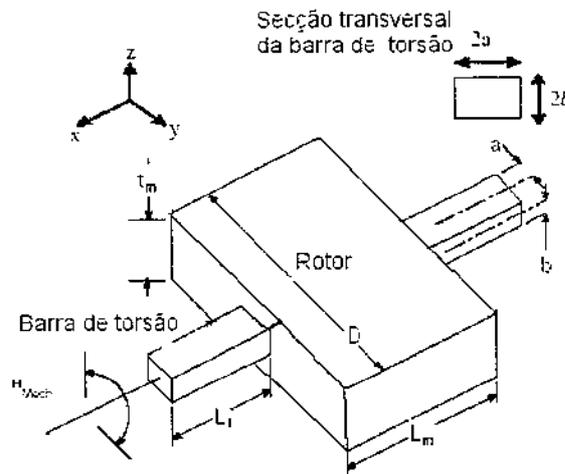


Figura 5.3: Convenções sobre a geometria do *scanner*. Urey 2005

5.2.2 Modos de vibração

Como já foi abordado nos capítulos 1 e 2, o *scanner* indutivo é um dispositivo oscilante. Segundo a elastodinâmica, qualquer oscilação é uma combinação de dois tipos de vibrações: forçada e ressonante. A vibração forçada pode ser devido a forças geradas internamente à estrutura, desbalanceamentos, forças externas ou excitação pelo ambiente. Já a vibração ressonante ocorre quando um ou mais modos naturais de oscilação são excitados. A vibração ressonante é causada pela interação entre as propriedades inerciais e elásticas da estrutura, de modo que a resposta oscilatória é amplificada para além dos níveis de tensão, deformação e deflexão causados por um carregamento estático. Mark H. Richardson 1999

Os modos, ou ressonâncias, são propriedades inerentes à estrutura. As frequências de ressonância são determinadas pelas propriedades do material (densidade, rigidez), amortecimento e condições de contorno da estrutura. Cada modo é definido por uma frequência natural (frequência modal ou ressonância), um amortecimento modal e pela sua forma. Excitando-se uma estrutura na frequência natural de um de seus modos, ou próximo a ela, seu modo operacional tenderá a ser dominado pela forma do modo ressonante.

Adicionalmente, os modos de vibração podem ser classificados em modos de corpo rígido ou de corpo flexível. Qualquer estrutura pode apresentar até seis modos de corpo rígido: os modos translacionais e rotacionais, ao longo e em torno dos eixos x, y e z. Os *scanners* indutivos são dispositivos torsionais, ou seja, o modo operacional desejado é o rotacional ao longo de suas barras torção, chamado modo torsional. Os demais modos são indesejados e prejudiciais ao desempenho do dispositivo, por introduzirem erros na posição do feixe luminoso, como o *wooble*, apresentado na seção 1.1.2.

5.2.3 Cálculo dos modos de vibração

Nesta seção, seguindo a abordagem proposta por Urey,^{Urey 2002} serão apresentados os principais modos de vibração que podem ocorrer em uma estrutura típica do *scanner*. Ao final da seção serão apresentadas equações de projeto que relacionam o modo torsional com os demais modos, em função de parâmetros geométricos da estrutura. Tais relações possibilitam o projeto do *scanner* de maneira a separar ao máximo o modo torsional desejado dos modos indesejados.

Os modos de corpo rígido para a estrutura típica do *scanner* são mostrados na fig. 5.4. Três modos rotacionais, em torno dos eixos x (torsional), y (rotacional transversal) e z (rotacional ortogonal), e dois modos translacionais, ao longo dos eixos y (horizontal) e z (vertical). O modo translacional ao longo do eixo x não foi considerado pelo fato das barras de torção estarem fixas em ambas extremidades, o que faz com que a sua rigidez nesta direção, e conseqüentemente sua ressonância, sejam muito mais altas do que nos demais modos.

Os modos de vibração são calculados com base nas dimensões do *scanner* e nas propriedades dos materiais. A frequência natural de modo de vibração, ω_Y , é calculada a partir da equação do movimento para partículas submetidas a uma força linear restauradora^{Symon 1982} descrita a seguir³

$$\ddot{Y} + \omega_Y^2 Y = 0 \quad (5.1)$$

³Nesta equação o rotor é considerado um corpo rígido, e a influência do amortecimento na frequência de ressonância é desprezível, pelo fato do sistema ser subamortecido.

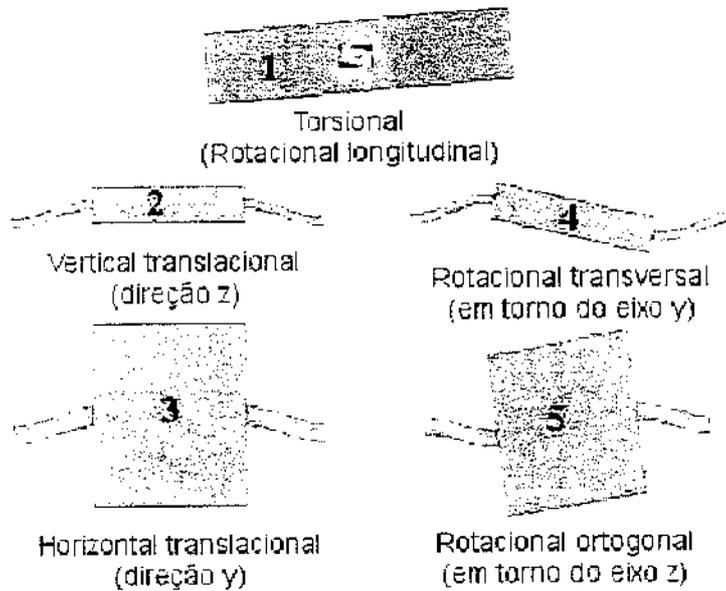


Figura 5.4: Modos de corpo rígido para o *scanner*

Onde Y e ω_Y são, respectivamente, o grau de liberdade, (GDL), e a frequência natural do modo em questão. Na tab. 5.4, são mostrados os graus de liberdade e equações referentes à cada modo considerado para o *scanner*.

Tabela 5.4: GRAUS DE LIBERDADE E EQUAÇÃO DO MOVIMENTO PARA OS MODOS FUNDAMENTAIS DE VIBRAÇÃO DO *scanner*.

MODO	GRAU DE LIBERDADE, Y	CONSTANTE, DE RIGIDEZ, k_Y	MASSA OU INÉRCIA EFETIVA, M_{eff}	FREQÜÊNCIA, NATURAL, ω_Y	EQUAÇÃO RESULTANTE
TORSIONAL	θ	k_θ	J_m	ω_θ	$\ddot{\theta} + \omega_\theta^2 \theta = 0$
HORIZONTAL TRANSLACIONAL	y	k_y	M_r	ω_y	$\ddot{y} + \omega_y^2 y = 0$
VERTICAL TRANSLACIONAL	z	k_z	M_r	ω_z	$\ddot{z} + \omega_z^2 z = 0$
ROTACIONAL TRANSVERSAL	θ_y	k_{θ_y}	J_{m_y}	ω_{θ_y}	$\ddot{\theta}_y + \omega_{\theta_y}^2 \theta_y = 0$
ROTACIONAL ORTOGONAL	θ_z	k_{θ_z}	J_{m_z}	ω_{θ_z}	$\ddot{\theta}_z + \omega_{\theta_z}^2 \theta_z = 0$

A frequência de ressonância de cada modo é dada por:

$$\omega_Y = 2\pi f_Y = \sqrt{\frac{k_Y}{M_{eff}}} \quad (5.2)$$

Onde k_y é a constante de rigidez para o grau de liberdade considerado, e M_{eff} é a massa efetiva, para os movimentos translacionais, ou o momento de inércia efetivos, nos movimentos rotacionais. A tab. 5.4, apresenta um resumo das variáveis utilizadas em cada modo.

Para simplificar os cálculos, serão desconsiderados o momento de inércia e a massa das barras de torção, também será assumido que toda flexão (ou torção) estará concentrada unicamente nas barras de torção (rotor considerado um corpo rígido), e que o efeito da ortotropia do material não é relevante⁴. Esta aproximação é válida para barras de torção não muito longas e com comprimento não muito menor que o do espelho. No trabalho de Urey 2005 são obtidas equações para o momento de inércia e constante torsional dos vários modos considerando-se a ortotropia do Si.

A seguir será apresentada a metodologia utilizada para obtenção dos modos de vibração do *scanner*.

Modo Torsional

A rigidez torsional das barras de torção é calculada com base na teoria da torção uniforme de Saint Venant.^{Timoshenko & Goodier. 1970} Por este método, a constante de rigidez torsional, k_θ é dada pelo produto do módulo de elasticidade⁵, G , e do momento de inércia polar, I , dividido pelo comprimento da barra de torção, L_f . A solução é válida para materiais isotrópicos, como o Aço e o Bronze-fosforoso, e ortotrópicos, como o Silício monocristalino.

$$k_\theta = \frac{2GI}{L_f} \quad (5.3)$$

onde o fator 2 deve-se à existência de 2 barras de torção.

O momento de inércia polar da barra de torção, I , para uma barra com seção transversal retangular, é dado por:

$$I = FF ab^3 \quad (5.4)$$

$$FF = \left[5.33 - 3.36 \frac{b}{a} \left(1 - \frac{b^4}{12a^4} \right) \right] \quad (5.5)$$

⁴Materiais ortotrópicos, apresentam diferentes propriedades mecânicas, módulo de Young e constante de Poisson, de acordo com o plano cristalino, como no caso do Si.

⁵Constante de proporcionalidade entre a tensão cisalhante e a deformação angular. Também conhecido como *Shear modulus*, ou módulo de torção.

onde FF é o fator de forma para uma barra de torção com seção transversal retangular, Roark & Young 1989 com largura igual a $w_f = 2a$, e altura, igual a ⁶ $t = 2b$.

A equação do movimento para o modo torsional, conforme a tab. 5.4, e a eq. 5.2, é dada por:

$$J_m \ddot{\theta} + \frac{2(GI)}{L_f} \theta = T \quad (5.6)$$

Onde θ é o ângulo de rotação mecânica, J_m é o momento de inércia do rotor em torno do eixo x , e T é um torque externo aplicado. O produto GI , considerando o material isotrópico, depende da forma e da seção transversal da barra de torção.

O momento de inércia, J_m , para um bloco retangular é dado por:

$$J_m = \frac{1}{12} \rho t L_m D^3 \quad (5.7)$$

onde ρ é a densidade do material utilizado no bloco, e t , L_m e D são a espessura, comprimento e largura do rotor, respectivamente, vide fig.5.3.

A frequência de vibração do modo torsional, de acordo com a eq. 5.2, é dada por:

$$\omega_\theta = \sqrt{\frac{k_\theta}{J_m}} \quad (5.8)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{24 \frac{FF a b^3}{L_f t L_m D^3} \frac{G}{\rho}} \quad (5.9)$$

para barras de torção com área transversal retangular.

A relação G/ρ é definida como coeficiente de ressonância torsional, e depende das propriedades físicas do material utilizado. Quanto maior esta relação, maior a frequência do modo torsional, ou seja, mais facilmente o dispositivo trabalhará em frequências mais altas. A tab. 4.1 apresenta uma comparação deste coeficiente para os diferentes materiais comparados nesta tese.

Demais modos

Os modos vertical e horizontal translacionais, e os modos rotacionais transversal e ortogonal são modelados utilizando a teoria de vigas de Euler-Bernoulli. Timoshenko & Goodier. 1970 Para estes

⁶Equação válida para $a > b$.

modos fletores a constante de rigidez é obtida resolvendo-se a equação diferencial de 4ª ordem para deflexão de um eixo, $w_0(x)$.^{Boresi & Chong 2000}

$$\frac{d^4 w_0}{dx^4} = 0 \quad (5.10)$$

onde o índice '0' refere-se à curva de deflexão do eixo neutro das barras de torção. As condições de contorno são estabelecidas de acordo com o modo de vibração em questão. O deslocamento da barra de torção, na extremidade ligada ao rotor, deve ser consistente com o sistema de coordenadas modal adotado. A força e o momento atuando sobre a extremidade da barra ($x = L_f$) são calculados como:

$$F = EI \left. \frac{d^3 w_0(x)}{dx^3} \right|_{x=L_f} \quad (5.11)$$

$$M = EI \left. \frac{d^2 w_0(x)}{dx^2} \right|_{x=L_f} \quad (5.12)$$

A rigidez efetiva pode ser calculada tomando-se a soma das forças e momentos apropriados no final da barra e balanceando-se os momentos translacionais ou angulares para o rotor. O procedimento utilizado segue as etapas abaixo:

1. Determina-se as condições de contorno da eq. de Euler-Bernoulli, eq. 5.10, para o modo considerado;
2. Obtém-se o deslocamento de acordo com o GDL do modo em questão, $w(x)$;
3. Calcula-se a força ou o momento de acordo com as eq. 5.11 ou 5.12;
4. A constante de rigidez para o modo considerado, k_Y , é obtida a partir da relação entre a força/momento e o deslocamento;
5. Obtém-se a equação para a massa ou momento de inércia efetivo;
6. A partir da eq. 5.2, calcula-se a frequência de ressonância do modo em questão.

Modo Vertical Translacional

As condições de contorno para este modo são obtidas com base nos deslocamentos mostrados na fig. 5.5. Em $x = 0$ a barra de torção está fixa, logo, o deslocamento e a velocidades são nulos. Em $x = L_f$, o deslocamento da barra é máximo, e a sua velocidade é nula, ou seja, $w(L_f) = z$ e

$$\dot{w}(L_f) = 0.$$

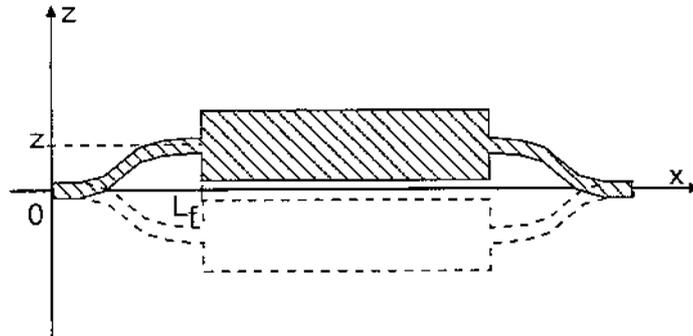


Figura 5.5: Deslocamentos no modo vertical translacional. Observe que o máximo deslocamento da barra de torção ocorre quando $x = L_f$, onde a velocidade é nula $\dot{w}(L_f) = 0$. Em $x = 0$ a barra está fixa, de modo que $\dot{w}(L_f) = 0$.

As condições de contorno para este modo são escritas como:

$$\begin{aligned} w_0(0) &= 0, & \dot{w}_0(0) &= 0 \\ w_0(L_f) &= z, & \dot{w}_0(L_f) &= 0 \end{aligned} \quad (5.13)$$

onde z é o máximo deslocamento ao longo do eixo z .

Resolvendo-se a eq. 5.10 conforme as condições de contorno estabelecidas, chega-se ao deslocamento ao longo do eixo z , em função de x , $w(x)$:

$$w(x) = \frac{F}{2EI} \left(\frac{x^3}{6} - \frac{L_f x^2}{4} \right) \quad (5.14)$$

A partir da tab. 5.4, a equação do movimento neste caso será:

$$M_{eff} \ddot{z} + k_z z = F_z \quad (5.15)$$

na qual as forças de amortecimento não foram consideradas. Considerando o caso estático ($\ddot{z} = 0$) da eq. 5.15, e utilizando-se a força calculada a partir da eq. 5.11, chega-se à:

$$k_z = F_z = -2F$$

A partir do deslocamento e da força, chega-se a constante de rigidez para o modo desejado, k_z :

$$k_z = \frac{24EI}{L_f^3} \quad (5.16)$$

$$I = \frac{4ab^3}{3} \quad (5.17)$$

Onde I é o momento polar de inércia que depende da forma da barra de torção.

A próxima etapa é a obtenção da massa do rotor. Dada pela eq. abaixo:

$$M_{eff} = M_r = \rho t L_m D \quad (5.18)$$

Onde ρ é a densidade do material, e t , L_m e D são a espessura, o comprimento e a largura do rotor, fig. 5.3.

Por fim, a partir dos valores da constante de rigidez e da massa efetiva, chega-se a uma equação para a frequência de ressonância do modo vertical translacional, ω_z :

$$\begin{aligned} \omega_z &= \sqrt{\frac{k_z}{M_r}} \\ f_z &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{32ab^3}{L_f^3 \rho t L_m D} \frac{E}{\rho}} \end{aligned} \quad (5.19)$$

A relação E/ρ é definida como coeficiente de ressonância não torsional, e depende unicamente das propriedades do material utilizado. Este coeficiente surge nos modos de vibração não torsionais, e, quanto maior o seu valor, mais facilmente os modos não torsionais conseguem ser separados do modo torsional principal. A tab. 4.1 apresenta uma comparação deste coeficiente para os diferentes materiais comparados nesta tese.

Modo Horizontal Translacional

O modo horizontal move o espelho na direção de y , conforme mostrado na fig. 5.6. As fórmulas para frequência deste modo são similares às do modo vertical, sendo que a única diferença é a troca na largura e espessura de flexão, a e b , respectivamente. Desta forma, para barras de torção com seção quadrada, as frequências dos modos horizontal e vertical devem ser idênticas.

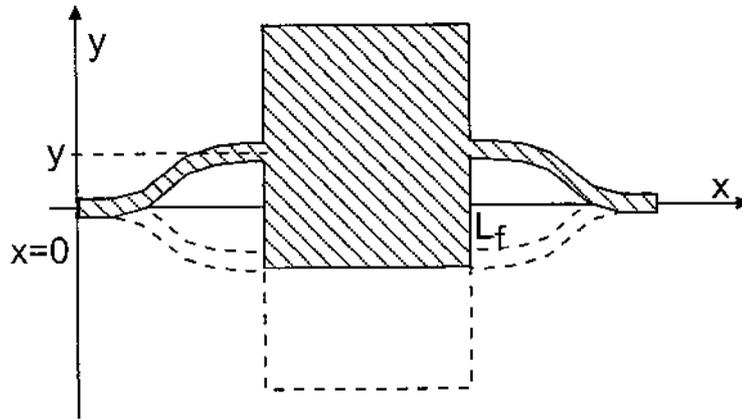


Figura 5.6: Deslocamentos no modo horizontal translacional. Observe que o máximo deslocamento da barra de torção ocorre quando $x = L_f$, onde a velocidade é nula $\dot{w}(L_f) = 0$. Em $x = 0$ a barra está fixa, de modo que $\dot{w}(L_f) = 0$.

As equações para este modo são apresentadas a seguir:

$$\begin{aligned} \omega_y &= \sqrt{\frac{k_y}{M_r}} \\ M_r &= \rho t L_m D \\ k_y &= \frac{24EI}{L_f^3} \\ I &= \frac{4ab^3}{3} \end{aligned} \tag{5.20}$$

A frequência de ressonância deste modo será dada por:

$$f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{32a^3 b E}{L_f^3 t L_m D \rho}} \tag{5.21}$$

Modo Rotacional Transversal

Neste modo de oscilação, o rotor é submetido a um torque em torno do eixo y, conforme mostra a fig. 5.7. Para $x = 0$, o deslocamento angular, $w(0) = 0$, para $x = L_f$ o deslocamento angular é dado por $\frac{\theta L_m}{2}$, onde L_m é o comprimento do espelho. A velocidade nestes pontos é $\dot{w}(0) = 0$ e

$$\dot{w}L_f = \theta_r.$$

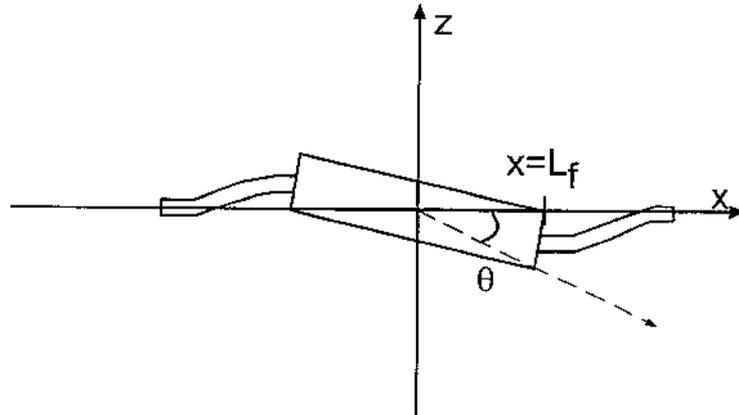


Figura 5.7: Deslocamentos no modo rotacional transversal. Observe que o máximo deslocamento angular da barra de torção ocorre quando $x = L_f$, onde a velocidade angular é $\dot{w}(L_f) = \theta_r$. Em $x = 0$ a barra está fixa, de modo que $\dot{w}(L_f) = 0$.

As condições de contorno para este modo são escritas como:

$$\begin{aligned} w_0(0) &= 0, & \dot{w}_0(0) &= 0 \\ w_0(L_f) &= \frac{L_m \theta_r}{2} & \dot{w}_0(L_f) &= -\theta_r \end{aligned} \quad (5.22)$$

A solução da equação de Euler-Bernoulli para este caso leva à equação de deflexão angular da viga descrita a seguir:

$$w_0(x) = \frac{-\theta_r(L_f + L_m)}{L_f^3} x^3 + \frac{\theta_r(L_f + 1,5L_m)}{L_f^2} x^2 \quad (5.23)$$

A equação do movimento para este caso é dada por:

$$\ddot{\theta}_y + \omega_{\theta_y}^2 \theta_y = T \quad (5.24)$$

onde T é um torque externo aplicado. Calculando-se o valor da força, eq. 5.11, e do momento angular, eq. 5.12, e assumindo que: Young & Budynas 2002

$$T = -2(M + FL_m) \quad (5.25)$$

Chega-se ao valor da constante de rigidez do modo, k_y , dada por:

$$k_{\theta y} = \frac{EI(4L_f + 3L_m)}{L_f^2} \quad (5.26)$$

Onde E é o módulo de Young do material, I é o momento de inércia polar da barra de torção, e L_f , L_m , são os comprimentos da barra de torção e do rotor, respectivamente.

O momento de inércia polar da barra é dado por:

$$I = \frac{4ab^3}{3} \quad (5.27)$$

E o momento de inércia do rotor é dado por:

$$J_{m\theta y} = \frac{1}{12}\rho tL_m^3D \quad (5.28)$$

Conhecendo-se os valores da constante de rigidez, $k_{\theta y}$ e o momento de inércia, chega-se, a partir da eq. 5.2, a equação para a frequência de ressonância do modo torsional transversal.

$$f_{\theta y} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{16E(4L_f + 3L_m)ab^3}{\rho tDL_m^3L_f^2}} \quad (5.29)$$

A relação E/ρ está presente nos modos horizontal, vertical translacionais e rotacional transversal e é chamada coeficiente de ressonância não-torsional, conforme explicado anteriormente.

Modo Rotacional Ortogonal

A formulação para o modo rotacional ortogonal é similar à do modo rotacional transversal, devendo-se simplesmente rotacionar a estrutura em 90° e calcular os momentos de inércia de acordo com a rotação. Para a geometria em questão, este modo terá frequência de ressonância bem acima da frequência do modo rotacional transversal, de forma que sua influência no comportamento do dispositivo será pequena.

Relações entre os modos

A tab. 5.5 apresenta um resumo das equações obtidas para os principais modos do *scanner*.

Tabela 5.5: FREQUÊNCIAS NATURAIS PARA DIFERENTES MODOS DE OSCILAÇÃO DE *scanners* TORSIONAIS (LARGURA = 2A, ESPESSURA DA MOLA = 2B)^{UREY 2002}

		RIGIDEZ DA MOLA k_θ INÉRCIA DA MOLA, I_s MOMENTO DE INÉRCIA, I_p	FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA
	Inércia do espelho	Para $a > b$; $k_\theta = \frac{2I_p G}{L_f}$	
MODO TORSIONAL	$J_m = \frac{1}{12} \rho t L_m D^3$	$I_p = FFab^3$, onde $FF = \left[5,33 - 3,36 \frac{b}{a} \left(1 - \frac{b^4}{12a^4} \right) \right]$	$\sqrt{\frac{k_\theta}{J_m}} = \sqrt{\frac{24FFG ab^3}{L_f \rho t L_m D^3}}$
	Massa do espelho		
MODO VERTICAL	$M_m = \rho t L_m D$	$k_\theta = \frac{24 E I_s}{L_f^3}$ $I_s = \frac{(2a)(2b)^3}{12} = \frac{4ab^3}{3}$	$\sqrt{\frac{k_\theta}{M_m}} = \sqrt{\frac{32 E a b^3}{L_f^3 \rho t L_m D}}$
	Massa do espelho		
MODO HORIZONTAL	$M_m = \rho t L_m D$	$k_\theta = \frac{24 E I_s}{L_f^3}$ $I_s = \frac{4a^3 b}{3}$	$\sqrt{\frac{k_\theta}{M_m}} = \sqrt{\frac{32 E a^3 b}{L_f^3 \rho t L_m D}}$
	Inércia do espelho		
MODO TORSIONAL	$J_m = \frac{1}{12} \rho t L_m^3 D$	$k_\theta = \frac{E I_s (4L_f + 3L_m)}{L_f^2}$ $I_s = \frac{4ab^3}{3}$	$\sqrt{\frac{k_\theta}{J_m}} = \sqrt{\frac{16 E (L_f + 3L_m) a b^3}{\rho D L_m^3 L_f^2}}$
TRANSVERSAL			

As frequências de vibração dos modos devem estar bem separadas da frequência do modo torsional e suas harmônicas, para minimizar a dissipação de potência e melhorar o fator de qualidade da estrutura. Os modos horizontal e vertical não alteram a direção do feixe refletido, entretanto o modo torsional ortogonal deflete o feixe incidente perpendicularmente à direção de varredura, criando um movimento indesejado que degrada a qualidade do feixe de varredura.

As dimensões do espelho devem ser escolhidas de maneira que os modos torsional ortogonal, vertical e horizontal estejam distantes do modo torsional e de suas harmônicas.

A razão entre a frequência torsional e as frequências dos modos indesejados, em função da largura do espelho D , e comprimento das barras de torção L_f , é dada por:

$$\frac{\omega_y}{\omega_\theta} = \sqrt{\frac{4E}{3FFGL_f} \frac{D}{L_f}} \quad (5.30)$$

Relação modo horizontal-torsional

$$\frac{\omega_z}{\omega_\theta} = \sqrt{\frac{4E}{3FFGL_f b} \frac{Da}{L_f}} \quad (5.31)$$

Relação modo vertical-torsional

$$\frac{\omega_{\theta y}}{\omega_\theta} = \sqrt{\frac{8E \left(1 + \frac{3L_m}{4L_f}\right)}{3FFG} \frac{D}{L_m}} \quad (5.32)$$

Relação modo torsional ortogonal-torsional

Para obter um fator de qualidade elevado o modo torsional deve ser o modo operacional da estrutura, e os outros modos devem ter a maior frequência possível.

A seguir serão apresentados os modelos dinâmicos para os *scanners* com um e dois rotores considerando-se apenas o modo torsional.

5.2.4 Modelo dinâmico

Nesta seção e na seguinte serão apresentados os modelos dinâmicos dos *scanners* com um e dois rotores no modo torsional. Nestes modelos considera-se que o dispositivo esteja oscilando unicamente no modo torsional, e que o(s) rotor(es) seja(m) rígido(s) e concentre(m) toda a massa do dispositivo.

As equações para o momento de inércia, a constante torsional e o atrito viscoso serão particularizadas para as geometrias propostas neste trabalho, e a partir destes modelos serão obtidas as frequências de ressonância e a amplitude de vibração para os modos torsionais.

Para o *scanner* com um rotor serão obtidas equações de projeto que relacionam parâmetros de desempenho do dispositivo, no caso frequência de ressonância e deflexão óptica, em função da geometria, do torque gerado pelo atuador magnético e de uma estimativa do fator de qualidade.

As equações de projeto para o *scanner* com dois rotores, devido à maior complexidade da estrutura e dos parâmetros envolvidos, fornecem somente uma estimativa das frequências de oscilação para os dois modos fundamentais da estrutura em função da geometria do dispositivo.

5.2.5 Modelo dinâmico - Scanner com um rotor

A equação diferencial que representa o movimento torsional de um *scanner* sujeito a um torque T_i

$$J_m \ddot{\theta}(t) + k_\theta \theta = T_i(t) - T_d(t) \quad (5.33)$$

onde J_m é o momento de inércia do espelho, k_θ é a constante de rigidez torsional das barras de torção, $T_d(t)$ é o torque dissipativo e $T_i(t)$ é o torque induzido pelo atuador.

A seguir serão apresentados os modelos físicos para cada um dos itens apresentados na eq. 5.33, particularizando para as geometrias propostas neste trabalho.

Momento de inércia do espelho - J_m

O momento de inércia em torno de um eixo é calculado a partir da distribuição da massa em torno do eixo dada por: ^{Symon 1982}

$$J = \iiint_{\text{volume}} \rho r^2 dV \quad (5.34)$$

A fig. 5.8 apresenta as duas possíveis geometrias para o rotor. O Bronze-fosforoso, corroído quimicamente através de corrosão isotrópica no processo de foto-fabricação, apresenta perfil aproximadamente retangular, mostrado na fig. 5.8(a). Já o Silício, devido ao processo de corrosão anisotrópica, apresenta um perfil trapezoidal, na qual o ângulo entre as faces laterais e a base é de $54,74^\circ$, definido por seus planos cristalinos. Na fig. 5.8(b), são representados apenas os planos paralelos ao eixo de rotação.

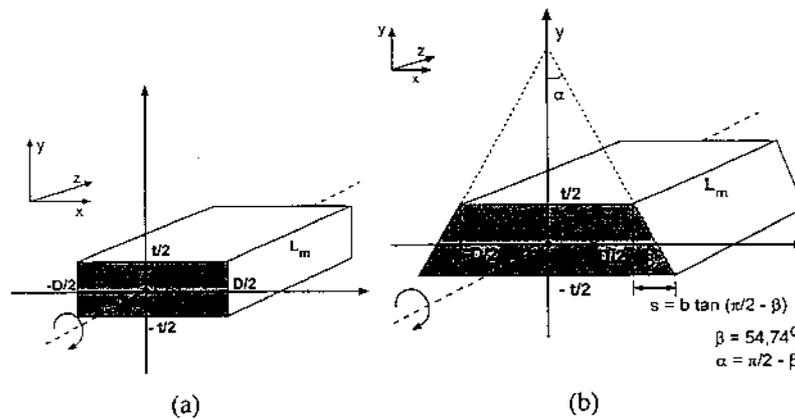


Figura 5.8: Desenho esquemático do rotor considerando (a) Seção retangular, (b) Seção trapezoidal.

Aplicando a eq. 5.34 para o perfil retangular chega-se ao momento de inércia do rotor em Bronze-fosforoso:

$$J_{mBF} = \frac{1}{12} \rho t L_m D^3 \quad (5.35)$$

Para o Silício, considerando o perfil trapezoidal, pode-se decompor o momento de inércia em duas componentes, uma devido ao bloco retangular, J_1 , e outra devido às inclinações da parede na direção paralela ao eixo de rotação, J_2 . Utilizando a eq. 5.34 para estas duas componentes, chega-se ao momento de inércia do rotor fabricado com Silício. ^{Jr. & Ferreira 1999}

$$J_{mSi} = J_1 + J_2 \quad (5.36)$$

$$J_1 = \frac{1}{12} \rho t L_m D^3$$

$$J_2 = \frac{\rho D}{12 \tan \alpha} \left[\left(\frac{D}{2} + t \tan \alpha \right)^4 - \frac{D^4}{2} \right] - \frac{1}{24} \rho D^4 t + \frac{1}{24} \rho D t^4 \tan \alpha$$

Simplificando-se a eq. 5.36, chega-se a:

$$J_{mSi} \cong \frac{1}{12} \rho t L_m D^3 \left[1 + 3 \left(\frac{t}{D} \right) \tan \alpha \right] \quad (5.37)$$

Como neste caso a largura do espelho, D , é muito maior que a espessura da lâmina de Silício, t , ($5000\mu m \times 200\mu m$), o erro devido à aproximação por uma seção retangular será menor do que 1%, de modo que o termo devido à inclinação das paredes pode ser desconsiderado.

5.2.6 Constante de rigidez torsional - k_θ

Dada pela eq. 5.3, depende do formato da seção transversal da barra, dada pelo fator de forma.

Constante de rigidez torsional - Seção transversal triangular

Devido ao processo de corrosão anisotrópica, a barra de torção feita em Silício apresenta uma seção transversal com perfil trapezoidal, fig. 5.9(a), com o topo da barra, w_f , definido pela máscara, no processo de foto-litografia, e a base, a , obtida a partir do processo de corrosão, sendo aproximadamente $\sqrt{2}b + w_f$, onde t é a espessura do substrato.

Como $a_{base} \approx 10w_f$, para simplificação dos cálculos, pode-se aproximar a seção transversal trapezoidal, por um triângulo isósceles, cujo momento de inércia polar, I , é dado por: Roark & Young 1989

$$I = \frac{\sqrt{2}t^4}{25} \quad (5.38)$$

No regime elástico, o ângulo de torção é proporcional ao torque por uma constante de propor-

$$\beta = 54.74^\circ$$

$$t' = t + 0.707 a_{\text{base}}$$

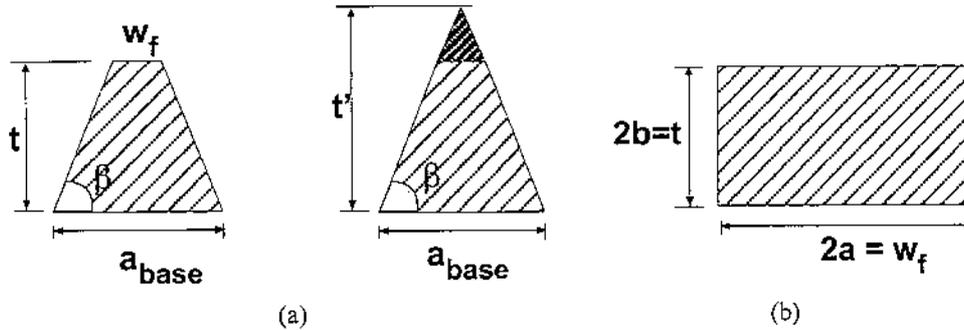


Figura 5.9: Seção transversal das barras de torção com seção (a) Trapezoidal, (b) Retangular

cionalidade inversamente proporcional a rigidez da barra de torção e dada por.^{Oliveira & Ferreira 2004}

$$k_\theta = \frac{2GI}{L_f} = \frac{\sqrt{2}t^4 G}{25 L_f} \quad (5.39)$$

Constante de rigidez torsional - Seção transversal retangular

Barras de torção feitas com materiais como o Bronze-Fosforoso apresentam perfil retangular⁷, fig. 5.9(b) de modo que são válidas as eq. 5.4 e 5.5. O que resulta numa constante de rigidez torsional dada por:

$$k_\theta = \frac{2FFab^3 G}{L_f} \quad (5.40)$$

onde FF o fator de forma é dado pela eq. 5.5:

$$FF = \left(5.33 - 3.36 \frac{b}{a} \left[1 - \frac{b^4}{12a^4} \right] \right)$$

Onde $b = t/2$, e $a = w_f/2$, metade da espessura e da largura da barra de torção, respectivamente.

⁷De fato, o perfil depende do processo de usinagem. Para o processo de foto-fabricação, utilizado nesta tese, o perfil pode ser considerado retangular.

A partir das eq. 5.40 e 5.38 foram traçados gráficos da constante de rigidez torsional de barras de torção em Si (perfil triangular), e em Bronze-fosforoso (Perfil retangular), para diferentes dimensões, fig. 5.23 e fig. 5.24. Estes gráficos têm o objetivo de auxiliar o projeto dos *scanners* e estão na seção que descreve o roteiro de projeto.

Constante de rigidez torsional - Barra em forma de serpentina

As barras de torção em forma de serpentina são amplamente utilizadas em micro-sistemas devido às baixas constante de torção obtidas, e à economia de espaço proporcionada pela sua utilização. A estrutura típica deste tipo de barra é mostrada na fig. 5.10(a).

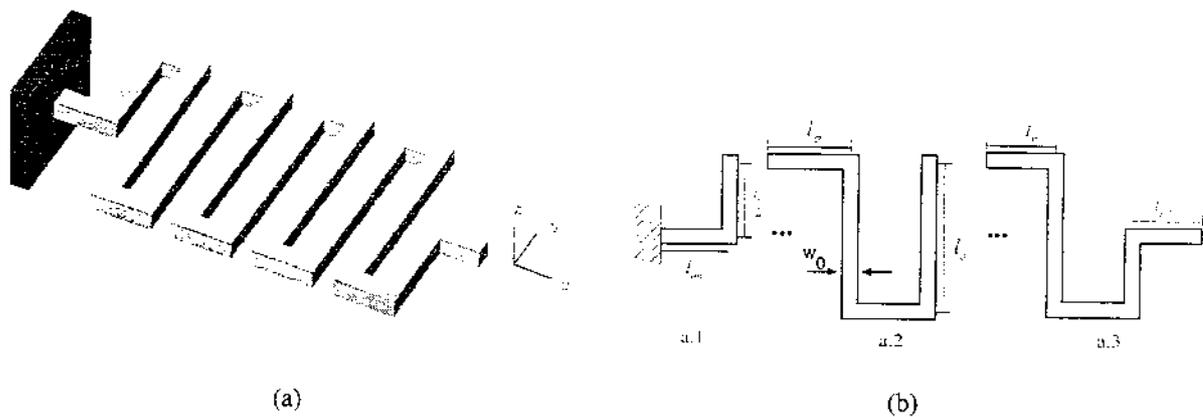


Figura 5.10: Barra de torção em formato de serpentina

Nesta tese as barras de torção em forma de serpentina foram utilizadas para reduzir a rigidez torsional das barras de torção, sem aumentar significativamente o tamanho dos dispositivos. *Scanners* com frequências da ordem de 100 *Hz* são utilizados na varredura vertical de sistemas de varredura XY. A constante de rigidez torsional para estas barras podem ser aproximadas por: ^{Barillaro 2005}

$$k_{\theta} = \frac{E w_0 t^3}{24(N+1)l_0} \quad (5.41)$$

onde E é o módulo de Young do material, t é a espessura da barra, N é o número de elementos da mola, w_0 é a largura da barra, e l_0 é o comprimento do elemento, fig. 5.10(b).

Torque dissipativo - $T_d(t)$

Em um sistema mecânico não-conservativo o amortecimento é responsável pela dissipação de energia. Um amortecedor ideal não possui massa nem efeito de mola, sendo a força por ele exercida função da velocidade entre suas extremidades. Um amortecedor ideal linear exerce uma força proporcional à velocidade de suas extremidades e que se opõe a este movimento.

Um amortecedor linear, também chamado viscoso, é aquele no qual as forças de atrito são geradas a partir do escoamento viscoso de um fluido em regime laminar. Para este tipo de amortecimento, o torque dissipativo pode ser descrito como:

$$T_d(\dot{\theta}) = b\dot{\theta} \quad (5.42)$$

Nos *scanners*, o atrito viscoso é resultado da reação ao movimento causado pelas partículas do fluido, no caso, o ar. A consideração de escoamento viscoso em regime laminar depende de fatores como a frequência do movimento, a densidade do fluido, o encapsulamento, entre outros. Uma série de trabalhos foram publicados sobre este fenômeno, devido à sua importância na determinação do fator de qualidade do dispositivo. Kleiman 1985, Cho 1994, Jr. & Ferreira 1999, Chang 2002, Nayfeh & Younis 2004

Neste trabalho não serão abordadas as particularidades referentes às interações fluido-estrutura para os *scanners*. Aqui será assumido que o dispositivo opera à pressão de 1 atmosfera, e encontra-se distante suficiente de paredes que possam interagir com as ondas acústicas causadas pelo movimento do dispositivo, de forma que o escoamento possa ser suposto laminar e o amortecimento viscoso considerado proporcional à velocidade.

Desta forma substitui-se a eq. 5.42 em 5.33 de modo que a equação mecânica do movimento fique linear.

Obtenção das equações de projeto Oliveira 2006

Substituindo-se os valores das constantes na equação de movimento do *scanner*, eq. 5.33, e resolvendo-se a equação, obtém-se os valores para a frequência de ressonância, f_r , a deflexão mecânica θ_r , e a fase do movimento, ϕ_r . Oliveira 2006

$$f_r = f_0 \left(1 - \frac{1}{2Q^2}\right)^{1/2} \quad (5.43)$$

$$\theta_r = \theta_0 Q \left(1 - \frac{1}{4Q^2}\right)^{1/2} \quad (5.44)$$

$$\phi_r = \tan^{-1} \left[2Q \left(1 - \frac{1}{2Q^2}\right) \right]^{1/2} \quad (5.45)$$

com:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_\theta}{J_m}} \quad (5.46)$$

$$\theta_0 = \frac{T_i}{k_\theta} \quad (5.47)$$

onde f_0 é a frequência natural do modo torsional, T_i é o torque indutivo e Q é o fator de qualidade da estrutura. Para valores do fator de qualidade maiores que duzentos, como os obtidos para os dispositivos estudados, pode-se simplificar estas equações assumindo-se que $f_r = f_0$, $\theta_r = \theta_0$ e $\phi_r = 90^\circ$.

A primeira equação de projeto do dispositivo é obtida, substituindo-se o momento de inércia do espelho⁸, J_m , eq. 5.36, e a constante de rigidez da barra de torção, k_θ , eq. 5.39, na equação 5.46. Com isso, obtém-se uma equação para a frequência de ressonância do dispositivo, em função de parâmetros geométricos e propriedades do material.

$$f_r(L_f) = \frac{b + \frac{\sqrt{2}}{2}a}{5\pi} \left[\frac{3\sqrt{2}}{\rho \cdot L_m \cdot D^3 \cdot L_f} \cdot G \right]^{1/2} \quad (5.48)$$

Onde L_f é o comprimento da barra de torção, $b = t/2$ é metade da espessura do substrato, $a = w_f/2$ é metade da largura da mola, L_m e D são o comprimento e a largura do espelho, respectivamente, e ρ e G são a densidade, e o módulo de elasticidade do material.

Para a metodologia de projeto proposta, adotou-se o ângulo mecânico de deflexão máximo, θ_r , como parâmetro a ser informado pelo projetista. Na ressonância, de acordo com a eq. 5.44, a

⁸Neste caso, como a largura do espelho é muito maior do que a espessura da lâmina, $D \gg t$, desprezou-se o termo devido à inclinação das paredes.

máxima deflexão na ressonância é dada por:

$$\theta_r = Q \cdot \frac{T_{imax}}{k_\theta} \quad (5.49)$$

O fator de qualidade, Q , presente na equação de projeto, 5.49, deve ser obtido de maneira empírica. Como afirmado anteriormente, a previsão deste fator deve levar em conta as interações fluido-estruturais e uma série de outros fenômenos não-lineares presentes no dispositivo, e que não são objetivo deste trabalho.

Desta forma, conhecendo-se o torque indutivo máximo, o fator de qualidade e a geometria das barras de torção, pode-se escrever o ângulo de deflexão máximo como função apenas do comprimento da barra de torção. Substituindo-se o valor de k_θ na eq. 5.49, e deixando-a em função de L_f , tem-se:

$$\theta_r(L_f) = Q \cdot \frac{T_{imax}}{k_\theta} = \left[\frac{25 \cdot Q \cdot (1 + \nu) \cdot T_{imax}}{\sqrt{2} \cdot b^4 \cdot E} \right] \cdot L_f \quad (5.50)$$

O torque indutivo de pico pode ser estimado pela equação, obtida a partir da derivação, no tempo, da corrente induzida na armadura.

$$T_{imax} = \left(\frac{B_{dc} A_a^2 A_{cross}}{2 \rho_{Cu} l_a} \right) (B_{ac} \omega_{drive} - B_{dc} \theta_{mea}) \quad (5.51)$$

onde B_{dc} é o campo magnético externo, A_a é a área da armadura, A_{cross} é a projeção da área da armadura na direção ortogonal ao movimento, ρ_{Cu} é a resistividade do material da bobina, l_a é o comprimento efetivo da bobina, B_{ac} é o valor de pico do campo AC gerado pelo mecanismo de atuação, e θ_{mea} é o valor estimado para o ângulo de deflexão máximo.

As equações de projeto para o *scanner* com um rotor aqui apresentadas, eq. 5.48, 5.49, 5.50 e 5.51, possibilitam o projeto de dispositivos com um rotor a partir dos parâmetros de desempenho e condições de atuação.

Nas próximas seções será apresentado o modelo elétrico utilizado para calcular o torque indutivo gerado pelo mecanismo de atuação.

5.2.7 Modelo dinâmico - Scanner com duplo rotor Oliveira & Ferreira 2003

Como abordado na seção 3.2, a separação entre os mecanismos de atuação (armadura) e reflexão (espelho) do *scanner* possibilita o projeto independente e particularizado de cada uma destas funções. Em contrapartida, a introdução de mais um elemento torsional (barra de torção) e inercial (rotor) aumenta a ordem do sistema, que agora passa a ser modelado como um duplo-pêndulo, em que existe o acoplamento entre dois osciladores harmônicos. Como consequência, torna-se mais difícil desenvolver modelos analíticos que possibilitem uma previsão acurada dos modos de oscilação da estrutura.

Nesta seção será apresentado o modelo dinâmico do *scanner* com duplo rotor, onde as seguintes considerações serão feitas:

- O dispositivo oscila no modo puramente torsional;
- Toda a inércia está contida nos rotores;
- Os rotores são considerados corpos rígidos (toda deflexão da estrutura concentra-se nas barras de torção);
- O amortecimento não será considerado, pois o dispositivo opera na ressonância e é subamortecido;

Desta forma, o movimento do *scanner* com duplo rotor é dado por um sistemas de equações diferenciais que relacionam o ângulo de deflexão dos dois rotores, θ_{r1} e θ_{r2} , com as propriedades físicas do material, com as dimensões do dispositivo e com o empacotamento.

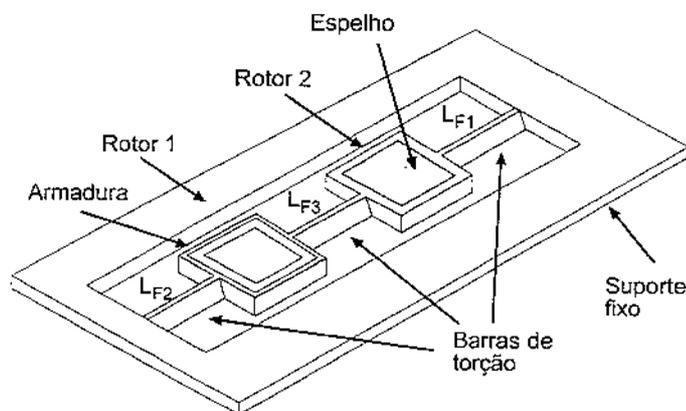


Figura 5.11: *Scanner* com duplo rotor

Supondo um torque $T_i(t)$ aplicado ao rotor 1, desprezando-se o torque dissipativo, considerando os dois rotores conectados através da barra de torção 3, como mostrado na fig. 5.11, o sistema de

equações diferenciais que descrevem o movimento será:

$$\begin{cases} J_{m1} \cdot \ddot{\theta}_1(t) + k'_{\theta 1} \cdot \theta_1(t) + k_{\theta 3} \cdot \theta_2(t) = T_i(t) \\ J_{m2} \cdot \ddot{\theta}_2(t) + k'_{\theta 2} \cdot \theta_2(t) + k_{\theta 3} \cdot \theta_1(t) = 0 \end{cases} \quad (5.52)$$

onde

J_{m1}, J_{m2} são os momentos de inércia dos rotores;

$k_{\theta 1}, k_{\theta 2}, k_{\theta 3}$ constante de rigidez torsional das 3 barras;

$$k'_{\theta 1} = k_{\theta 3} + k_{\theta 1}$$

$$k'_{\theta 2} = k_{\theta 3} + k_{\theta 2}$$

Nestas equações, o momento de inércia do rotor e do espelho são dados pela eq. 5.7, e a constante de rigidez torsional é dada pela eq. 5.39, para o dispositivo em Silício, ou eq. 5.40 para o dispositivo em Bronze-fosforoso. Resolvendo-se o sistema dado pelas eq. 5.52 obtém-se os valores da frequência dos modos de vibração torsionais da estrutura, $\omega_{\theta 1}$ e $\omega_{\theta 2}$:

$$\begin{aligned} \omega_{\theta 1}^2 &= \omega_{10}^2 + \frac{1}{2} \cdot \Delta\omega^2 \\ \omega_{\theta 2}^2 &= \omega_{20}^2 - \frac{1}{2} \cdot \Delta\omega^2 \end{aligned} \quad (5.53)$$

onde ω_{10} , ω_{20} , as frequências em que um rotor vibraria se o outro estivesse fixo, e espaçamento entre as frequências dos modos torsionais, $\Delta\omega$, são dados por:

$$\begin{aligned} \omega_{10} &= \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{FF \cdot G}{l_{f1} \cdot l_{f3} \cdot J_{m1}} \cdot (l_{f1} + l_{f3})} \\ \omega_{20} &= \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{FF \cdot G}{l_{f2} \cdot l_{f3} \cdot J_{m2}} \cdot (l_{f2} + l_{f3})} \\ \Delta\omega &= \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{(\omega_{10}^2 - \omega_{20}^2) \cdot \left[\left(1 + \frac{4\kappa^4}{(\omega_{10}^2 - \omega_{20}^2)^2} \right)^{1/2} - 1 \right]} \end{aligned} \quad (5.54)$$

Onde G é o módulo de elasticidade, l_{f1} , l_{f2} e l_{f3} são os comprimentos, e FF é o fator de forma das barras de torção, dado pela eq. 5.38, para a barra de torção trapezoidal (de Silício), ou pela eq. 5.5, para barras com seção retangular (de Bronze fosforoso).

O fator de acoplamento entre o movimento dos dois rotores é dado por:

$$\kappa^2 = \frac{FF \cdot G}{I_{f3} \cdot \sqrt{J_{m1} \cdot J_{m2}}} \quad (5.55)$$

A inclusão do efeito do amortecimento viscoso no modelo do dispositivo com dois rotores representaria um aumento na complexidade das equações de projeto, sem um ganho na precisão do modelo, uma vez que os valores das constantes de amortecimento continuariam a ser determinados empiricamente. Optou-se, nesta tese, por obter equações analíticas mais simples que pudessem fornecer dados iniciais para a geometria do dispositivo que pudessem servir de parâmetros de entrada para os modelos por elementos finitos.

5.3 Modelo Elétrico

O modelo elétrico do *scanner* tem como objetivo fornecer equações para a tensão induzida na armadura do dispositivo. Como mostrado nos capítulos 2 e 3, o torque induzido é diretamente proporcional à tensão induzida na armadura do dispositivo.

Do ponto de vista elétrico, o *scanner* pode ser considerado um transformador cujo enrolamento primário, denominado estator⁹, possui N_e espiras e está fixo, e o enrolamento secundário, denominada armadura, possui uma única espira que está curto-circuitada e possui liberdade de movimento em torno do eixo de rotação do dispositivo. Desta forma, o esquema elétrico correspondente ao *scanner* é mostrado na fig. 5.12

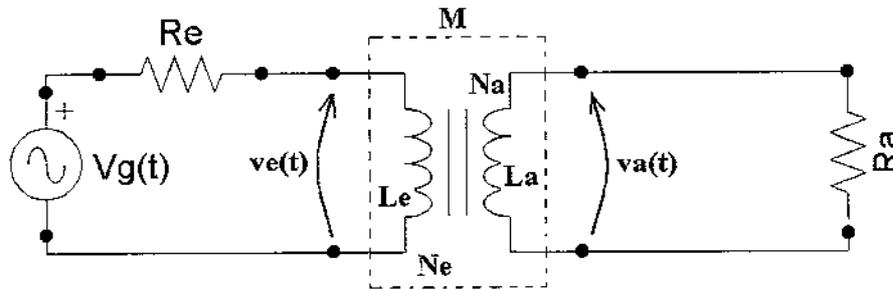


Figura 5.12: Esquema elétrico equivalente do *scanner*. O enrolamento do estator possui resistência R_e e indutância L_e , e a armadura, possui resistência R_a e indutância L_a . O dispositivo possui configuração semelhante a um transformador cujo secundário (armadura) possui liberdade de rotação em torno do eixo do dispositivo.

Neste ponto, vamos supor o secundário fixo, de forma que a f.c.e.m. induzida pelo movimento da armadura no campo magnético gerado pelos ímãs permanentes será nula¹⁰. Este efeito será considerado no modelo eletromecânico do dispositivo.

A seguir será feita a análise dos atuadores fracamente e fortemente acoplados.

⁹A nomenclatura adotada, estator e armadura, são originários da teoria de máquinas elétricas. No caso, o estator é a bobina estática, e a armadura a bobina móvel, também conhecida como enrolamento do rotor.

¹⁰Ao considerarmos a armadura fixa, estamos aproximando o modelo do *scanner* ao modelo de um transformador elétrico. De fato, o valor real da tensão induzida na armadura será menor do que o previsto por este modelo. Neste modelo, assume-se que esta diferença não será relevante, de forma que uma forma simplificada da tensão induzida possa ser obtida. Entretanto, esta hipótese deve ser validada experimentalmente.

5.3.1 Atuador fracamente acoplado

A utilização do atuador fracamente acoplado para acionamento do *scanner* indutivo foi proposta por Ferreira 1998 e baseia-se no circuito magnético proposto por Brosens 1976,^{Brosens 1976} hoje utilizado em grande parte dos *scanners* do tipo galvanométrico (Galvos).

Na fig. 5.13(a) é ilustrada a idéia de Brosens 1976, e na fig. 5.13(b), a adaptação do atuador para o dispositivo indutivo. O atuador é composto por uma ponte magnética na qual dois fluxos magnéticos estão presentes, um fluxo estacionário, induzido pelos ímãs permanentes, e um fluxo alternado, chamado fluxo de controle, induzido pela passagem da corrente alternada pelas bobinas de atuação. A armadura é posicionada no interior da ponte magnética, de forma que o fluxo de controle a atravesse perpendicularmente, e induza uma tensão na armadura. A corrente induzida deve interagir com o fluxo estacionário, e gerar um binário de forças, forças de Lorentz, que será responsável pela deflexão da estrutura. A intensidade da força induzida está diretamente relacionada à indutância mútua entre estator e a armadura, e à intensidade do campo magnético gerado pelos ímãs permanentes. A fig. 5.13(c), apresenta uma visão esquemática do funcionamento do atuador.

A tensão no secundário ou armadura é obtida através do conceito de indutância mútua apresentado no capítulo 2. Segundo este modelo, se a relutância¹¹ do ferro for desprezada¹² e o núcleo não estiver saturado, a tensão induzida na armadura é dada por:

$$v_a(t) = L_a \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_e}{dt} \quad (2.27)$$

onde L_a é a indutância da armadura, i_e é a corrente no estator, e M é a indutância mútua.

Como a bobina da armadura apresenta apenas uma espira, vamos desprezar a indutância L_a . Reescrevendo-se a eq. 2.27:

$$v_a(t) = M \frac{di_e}{dt} \quad (5.56)$$

Utilizando a lei de Kirchoff para o circuito do estator, podemos escrever i_e em termos da tensão

¹¹A relutância magnética é a resistência de um material à passagem do fluxo magnético. É o análogo magnético da resistência elétrica.

¹²O que equivale a dizer que toda força magnetomotriz está aplicada no entreferro.

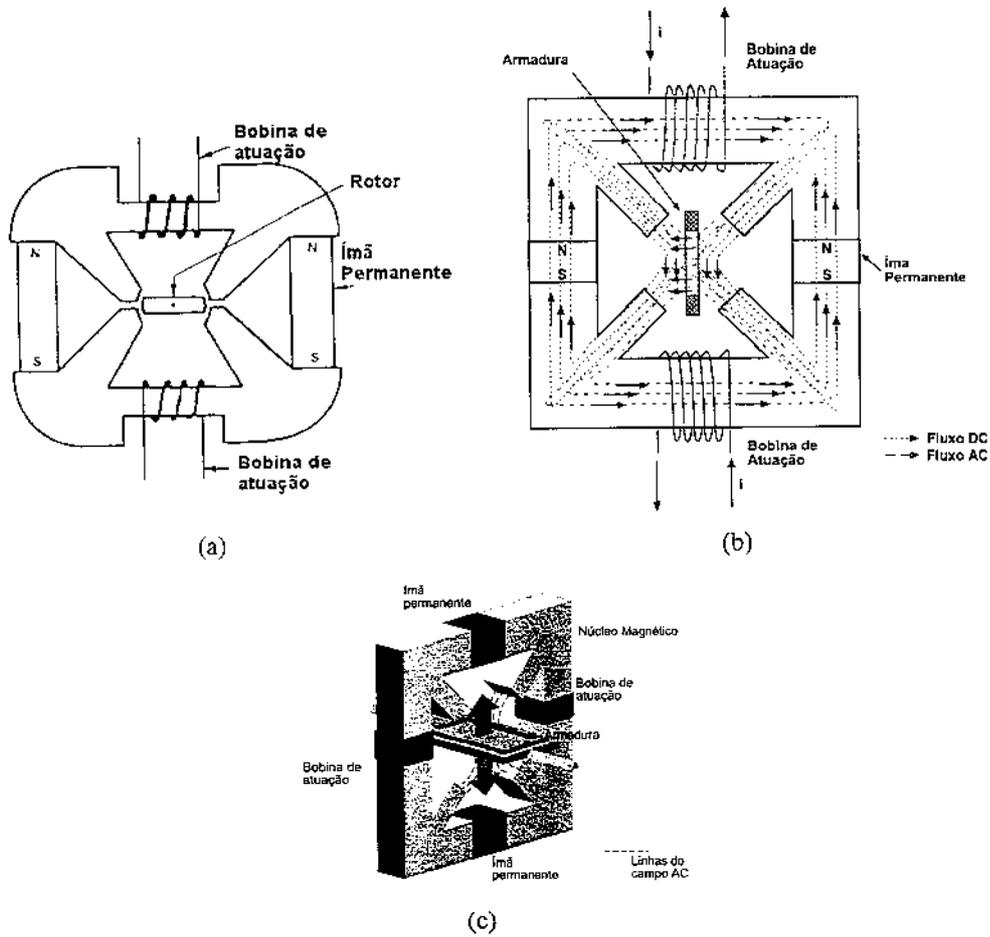


Figura 5.13: Atuador fracamente acoplado. Uma tensão é induzida na armadura pela variação no tempo do fluxo gerado pela passagem da corrente nas bobinas de atuação. A corrente gerada interage com o fluxo estacionário gerado pelos ímãs permanentes, e um binário de forças, forças de Lorentz, é gerado. (a) Idéia original, ^{Brosens 1976} (b) Aplicação no *scanner* indutivo, ^{Ferreira 1998} (c) Ilustração tridimensional do atuador.

do gerador:

$$i_e(t) = \frac{v_e(t)}{R_e + j\omega L_e} \tag{5.57}$$

onde ω é a frequência de operação do dispositivo e ωL_e é a reatância indutiva do estator. Substituindo-se a eq. 5.57 na eq. 5.56, tem-se:

$$v_a(t) = -\frac{M}{R_e + j\omega L_e} \dot{v}_e(t) \tag{5.58}$$

uma equação para a tensão induzida na armadura em função de parâmetros físicos e do sinal do gerador.

A indutância mútua pode ser obtida experimentalmente de várias formas, Ferreira 1998 obteve este valor medindo o valor de pico do campo magnético alternado, B_{ac} , a corrente de pico no estator, I_e , utilizando a equação abaixo:

$$M = \frac{AB_{ac}}{I_e} \quad (5.59)$$

Onde A é a área da armadura. O valor encontrado experimentalmente para a indutância mútua é da ordem de $10^{-8} H$.

A seguir será apresentado um modelo para a atuador fortemente acoplado onde poderá ser observado o ganho potencial no desempenho do dispositivo que utiliza esta geometria.

5.3.2 Atuador fortemente acoplado

O atuador fortemente acoplado é mostrado na fig. 5.14. Na figura pode ser observado o núcleo ferromagnético atravessando a armadura. Nesta configuração o fluxo magnético gerado pela bobina de atuação fica confinado à estrutura, de forma que quase sua totalidade atravessa perpendicularmente a área definida pela armadura do dispositivo. Este fato justifica o ganho de desempenho por esta geometria em comparação com o atuador fracamente acoplado, onde somente uma pequena parte do fluxo atravessa a armadura.

Para este caso, como o fluxo está quase que totalmente confinado no circuito magnético, pode-se utilizar a relação de transformação para um transformador ideal¹³. A relação entre a tensão no primário com N_e espiras, e_1 , e no secundário, com N_a espiras, e_2 , para um transformador ideal é dada por: Slemon 1966

$$e_2 = \frac{N_a}{N_e} e_1 \quad (5.60)$$

¹³Em um transformador ideal a resistência dos enrolamentos não é considerada, o fluxo é suposto inteiramente confinado ao núcleo magnético e acoplado totalmente a todas as espiras dos dois enrolamentos, a relação entre B-H é dada por uma linearização da curva de histerese, e o fluxo magnético nunca excede o valor máximo dado pela curva B-H, ou seja, o núcleo não sofre saturação.

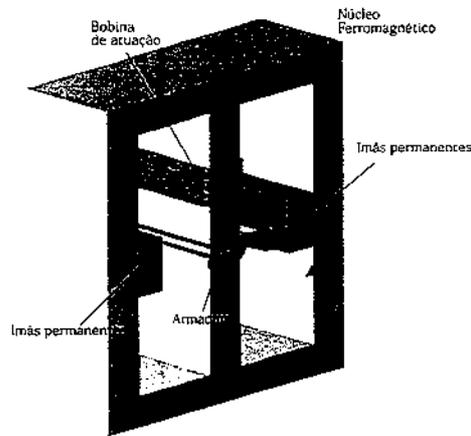


Figura 5.14: Atuador fortemente acoplado. Nesta configuração, o fluxo magnético alternado gerado pela passagem da corrente elétrica na bobina de atuação é confinado no caminho magnético, de forma que apenas uma pequena parte não passa pela armadura. Com isso o *scanner* pode ser modelado, do ponto de vista elétrico, como um transformador ideal.

Particularizando-se a eq. 5.60 para o *scanner* indutivo onde $N_a = 1$, tem-se:

$$v_a(t) = \frac{1}{N_e} v_e(t) \quad (5.61)$$

Onde $v_a(t)$ é a tensão induzida na armadura e $v_e(t)$ é a tensão de acionamento, de acordo com a fig. 5.12. Por esta equação observa-se como relacionam-se a tensão induzida na armadura e a de acionamento.

Neste ponto, vamos estudar como a tensão de atuação v_e se relaciona com a corrente de atuação e com o fluxo magnético gerado por ela. Conhecendo-se o comportamento de v_e , pode-se determinar a tensão induzida através da eq. 5.61.

Pelo circuito apresentado na fig. 5.12, considerando-se o circuito série do primário, tem-se que:

$$v_e(t) = \underbrace{R_e i_e(t)}_{\text{resistivo}} + \underbrace{\frac{d\lambda_1(t)}{dt}}_{\text{f.e.m.}} \quad (5.62)$$

onde R_e é a resistência do primário, i_e é a corrente instantânea e λ_1 é o fluxo instantâneo concatenado ao primário, e o termo $d\lambda_1/dt$ representa a queda de tensão na indutância do primário.

O fluxo magnético produzido por uma força magnetomotriz depende das propriedades magnéticas do material que forma o circuito magnético. Em materiais ferromagnéticos, esta relação é

dada pela curva de histerese, fig. 5.15.

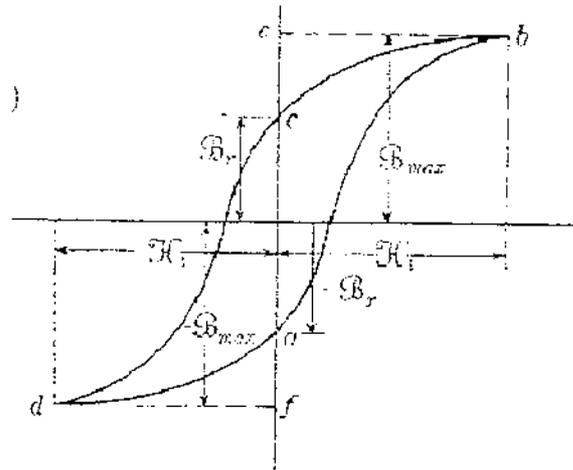


Figura 5.15: Curva de histerese - relação não linear entre o fluxo e a corrente de excitação

De acordo com a eq. 5.62, a corrente de excitação deve-se auto-ajustar de maneira que a queda de tensão instantânea na resistência, $R_e \cdot i_e(t)$, somada à f.e.m. devido ao indutor, seja igual à tensão do gerador, $v_e(t)$. Quando tanto a queda de tensão na resistência, quanto a f.e.m. são importantes, a solução da eq. 5.62 torna-se complexa devido a vários fatores. Primeiramente, a curva de histerese que relaciona a corrente de excitação ao fluxo gerado não é linear e nem sequer unívoca. Adicionalmente, a forma da curva de histerese depende da amplitude da corrente, de forma que não é possível nem mesmo determinar em qual curva de uma família o núcleo está operando sem conhecimento prévio da corrente ou do fluxo.

A fig. 5.16(a) mostra a forma de onda da corrente no primário, da tensão induzida na armadura e da tensão aplicada por um gerador. Devido à não-linearidade magnética do núcleo, a corrente de excitação não é senoidal mesmo quando a tensão no gerador o é. Portanto, a queda de tensão na resistência é não-senoidal seguindo o mesmo padrão da corrente. A fig. 5.16(b), mostra a tensão induzida na armadura, v_a , obtida a partir dos gráficos mostrados na fig. 5.16(a). A forma de onda da tensão induzida na armadura é notavelmente não-senoidal, entretanto a soma das componentes resistiva e da força contra-eletromotriz no primário aproxima-se ao de uma senóide, conforme a curva pontilhada.

Assim sendo, a forma-de-onda da tensão induzida na armadura, e da corrente de excitação devem-se auto-ajustar de forma a produzir harmônicos na tensão induzida que são iguais e opostos aos harmônicos causados pela queda de tensão não-senoidal na resistência do primário, R_e , devido à corrente de excitação.

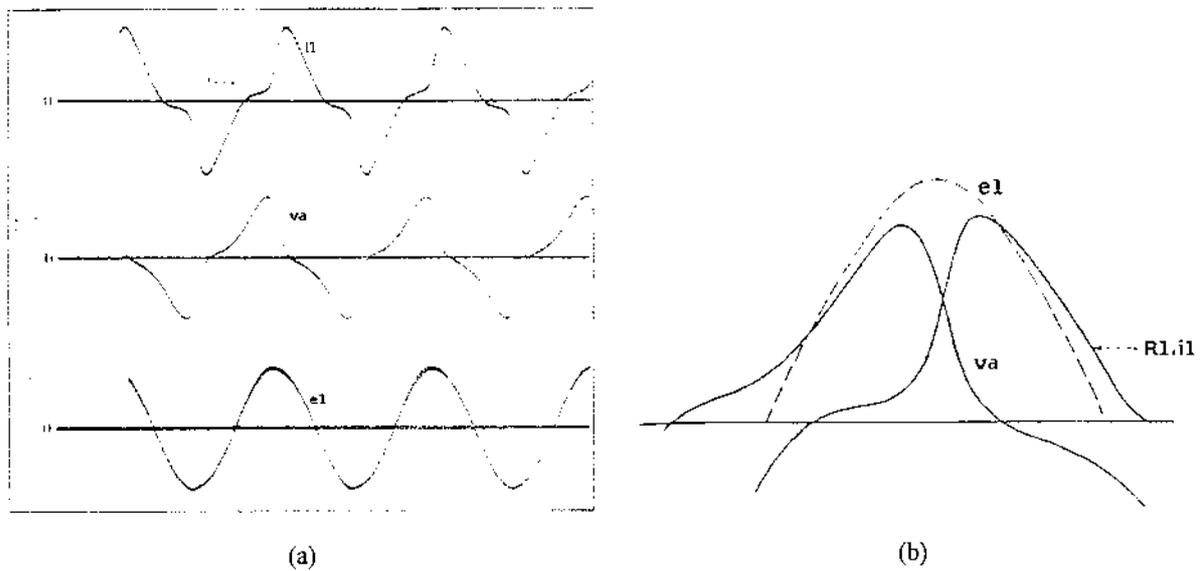


Figura 5.16: Forma de onda da corrente no primário, da tensão induzida e da tensão do gerador quando tanto o termo resistivo quanto a força contra-eletromotriz são consideradas.

Escrevendo-se a tensão devido à força contra-eletromotriz em função dos parâmetros físicos do dispositivo, tem-se:

$$\begin{aligned} \lambda_1(i_e) &= A\mu_r N_e i_e(t) \\ v_{L1} &= \frac{d\lambda_1}{dt} = A\mu_r N_e \frac{di_e(t)}{dt} \end{aligned} \quad (5.63)$$

onde A é área da seção transversal da parte do núcleo magnético que atravessa a armadura, N_e é o número de espiras da bobina de atuação e μ_r é a permeabilidade relativa do material do núcleo na frequência de operação do dispositivo.

Substituindo a eq. 5.63 em 5.62, tem-se a tensão induzida na armadura:

$$v_e(t) = R_e i_e(t) + A\mu_r N_e \frac{di_e(t)}{dt}$$

A tensão induzida na armadura em termos dos parâmetros de entrada é dada por:

$$\boxed{v_a(t) = \frac{1}{N_e} R_e i_e(t) + A\mu_r N_e \frac{di_e(t)}{dt}} \quad (5.64)$$

No projeto do dispositivo é interessante que a tensão induzida na armadura aproxime-se o máximo possível de uma senóide para que a corrente induzida na armadura e, conseqüentemente, o torque induzido apresente o máximo valor eficaz possível. Isto é possível se a contribuição da f.e.m. na eq. 5.62 for muito maior que a contribuição da queda de tensão resistiva. Se essa condição for verdadeira, o fluxo gerado, v_{fem} e v_a tenderão a ser uma onda senoidal. O aumento da reatância indutiva do primário devido a um aumento de L_e , ou da frequência de operação podem contribuir para que isto ocorra.

Na seqüência do capítulo os modelos mecânico e elétrico apresentados até aqui serão agrupados nos modelos eletromecânicos dos *scanners* com um e dois rotores.

5.4 Modelo eletromecânico por parâmetros concentrados

Os modelos analíticos apresentados serão reunidos nos modelos eletromecânicos por parâmetros concentrados dos dispositivos com um e dois rotores. De acordo com a metodologia de projeto proposta, a simulação destes modelos deve fornecer informações sobre a geometria dos dispositivos que serão introduzidas como parâmetros iniciais nos modelos por elementos finitos, onde serão ajustadas.

Os modelos eletromecânicos fornecem as funções de transferência dos dispositivos, podendo ser utilizados para visualização do comportamento dinâmico do dispositivo e introduzidas em malhas para controle.

Os modelos propostos nesta seção serão considerados lineares, de modo que a teoria de análise de sistemas lineares^{Ogata 1982} possa ser utilizada. Esta afirmação é verdadeira se considerarmos que o atuador não está saturado, que o sistema está sujeito a pequenas deflexões angulares ($< 10^\circ$ mec), e que o amortecimento viscoso possui comportamento linear¹⁴.

5.4.1 Scanner com simples rotor

O modelo eletromecânico equivalente para o *scanner* indutivo com um rotor é apresentado na fig. 5.17. Uma tensão $v_e(t)$ aplicada a um indutor L_e com resistência R_e , gera uma corrente i_e no primário do dispositivo. O acoplamento mútuo entre L_e e a armadura do dispositivo com resistência R_a e indutância L_a , faz com que seja gerada uma tensão, v_a , e uma corrente i_a percorre a armadura. A interação entre esta corrente e um campo magnético externo B_{dc} produz um torque que atua sobre o momento de inércia, J_m , do rotor, sujeito a um amortecimento viscoso b e conectado a duas barras de torção com rigidez torsional k_θ . O movimento da armadura no campo magnético externo induz uma força contra-eletromotriz, v_b , que se opõe à tensão induzida pelo atuador.

A função de transferência do *scanner* é obtida igualando-se o torque indutivo, $T_i(t)$, ao torque reativo mecânico, $T_{mec}(t)$:

$$T_{mec}(t) = T_i(t) \quad (5.65)$$

O torque mecânico, estudado no modelo dinâmico da estrutura, é dado pela eq. 5.33:

$$T_{mec}(t) = J_m \ddot{\theta}(t) + b\dot{\theta} + k_\theta \theta \quad (5.33)$$

¹⁴Condições que podem ser consideradas verdadeiras para os dispositivos estudados nesta tese.

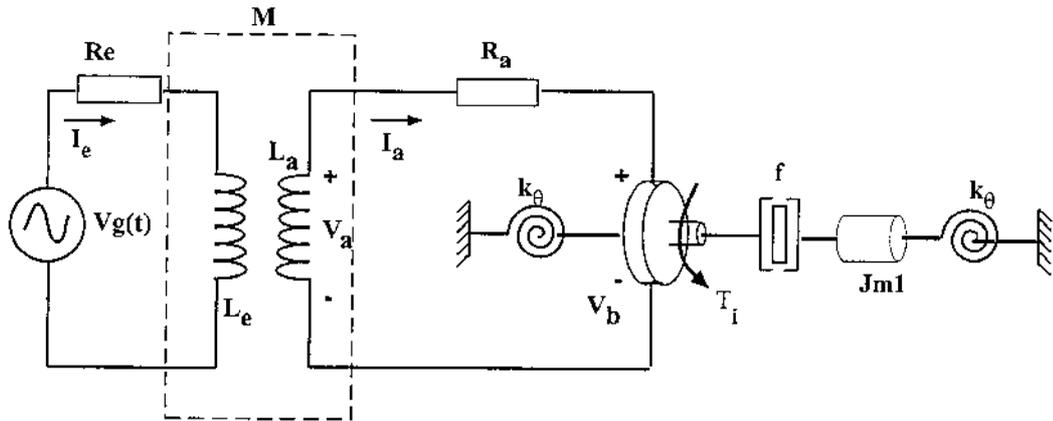


Figura 5.17: Modelo eletromecânico para o scanner com um rotor

O torque indutivo, originário das forças de Lorentz, eq. 2.28, é dado por:

$$T_i(t) = NB_{dc}A i_a(t) \quad (5.66)$$

Onde B_{dc} é o campo magnético externo gerado pelos ímãs permanentes, A e i_a são a área e a corrente induzida na armadura, respectivamente, e N é o número de espiras da armadura, no caso $N = 1$.

Desprezando-se a indutância da armadura, a corrente induzida na armadura $i_a(t)$ é obtida aplicando-se as leis de Kirchoff ao circuito do secundário no modelo eletromecânico equivalente, fig. 5.17. Desta forma tem-se:

$$T_i(t) = B_{dc}A \left(\frac{v_a(t) - v_b(t)}{R_a} \right) = K_m \left(\frac{v_a(t) - v_b(t)}{R_a} \right) \quad (5.67)$$

Nesta equação o termo $v_b(t)$ é resultado da interação eletromecânica devido ao movimento da bobina da armadura no campo externo B_{dc} . Esta tensão é proporcional à velocidade angular da armadura, sendo dada por:

$$v_b(t) = NB_{dc}A \frac{d\theta}{dt} = K_b \frac{d\theta}{dt} \quad (5.68)$$

Utilizando o formalismo das transformadas de Laplace para descrever o sistema, onde s é uma

variável complexa, e substituindo-se 5.68 em 5.67 obtém-se uma equação para o torque indutivo:

$$T_i(s) = K_m \left(\frac{v_a(s) - K_b s \theta(s)}{R_a} \right) \quad (5.69)$$

Resolvendo-se a eq. 5.65 para o ângulo de deflexão, $\theta(s)$, obtém-se uma equação que relaciona o ângulo de deflexão, $\theta(s)$, com a tensão induzida na armadura, v_a :

$$\theta(s) = \frac{B_{dc} A}{R_a J_m} \frac{v_a(s)}{s^2 + s \left(\frac{f}{J_m} + \frac{(B_{dc} A)^2}{R_a J_m} \right) + \frac{k_\theta}{J_m}} \quad (5.70)$$

Esta equação servirá como base para obtenção da função de transferência para os dispositivos fraca e fortemente acoplados, conforme será visto em seguida.

O objetivo do modelo eletromecânico é fornecer uma relação entre uma variável de entrada e uma de saída, a função de transferência, para os *scanners* propostos. A eq. 5.70 fornece uma relação entre a variável de interesse, o ângulo de deflexão, e a tensão induzida na armadura, uma variável de entrada. Entretanto, para que o modelo fique mais efetivo, seria desejável descrever a tensão induzida na armadura em função das variáveis de entrada do dispositivo, no caso a tensão aplicada aos seus terminais, v_e . Os modelos elétricos para os dispositivos forte e fracamente acoplados, estudados anteriormente, fornecem esta relação.

A tensão induzida na armadura para o *scanner* fracamente acoplado é dada pela eq. 5.58, reescrita a seguir:

$$v_a(t) = -\frac{M}{R_e + j\omega L_e} \dot{v}_e(t) \quad (5.71)$$

Onde R_e , L_e são a resistência e indutância do circuito primário do atuador e M é a indutância mútua entre o estator e a armadura. Reescrevendo-se a eq. 5.58 em termos da variável complexa, s , tem-se:

$$v_a(s) = -\frac{M}{R_e + sL_e} s v_e(s) \quad (5.72)$$

Para o dispositivo fortemente acoplado, supondo que a f.e.m. no primário seja muito maior que

a queda de tensão na resistência¹⁵, tem-se que a tensão na armadura é dada pela eq. 5.61:

$$v_a(t) = \frac{1}{N_e} v_e(t) \quad (5.73)$$

Onde N_e é o número de espiras no enrolamento primário. Reescrevendo-se a eq. 5.61 em termos da variável complexa s , tem-se:

$$v_a(s) = \frac{1}{N_e} v_e(s) \quad (5.74)$$

A partir destas relações, obtém-se a função de transferência dos *scanner* substituindo-se as eq. 5.72 e 5.74 na eq. 5.70, assim sendo:

$$\frac{\theta(s)}{v_e(s)} = \left[\frac{B_{dc} A^2 M}{R_a J_m} \right] \frac{s}{s^2 + s \left(\frac{f}{J_m} + \frac{(B_{dc} A)^2}{R_a J_m} \right) + \frac{k_\theta}{J_m}} \frac{1}{(R_e + s L_e)} \quad (5.75)$$

Func. transf. scanner fracamente acoplado

$$\frac{\theta(s)}{v_e(s)} = \left[\frac{B_{dc} A^2}{N_e R_a J_m} \right] \frac{1}{s^2 + s \left(\frac{f}{J_m} + \frac{(B_{dc} A)^2}{R_a J_m} \right) + \frac{k_\theta}{J_m}} \quad (5.76)$$

Func. transf. scanner fortemente acoplado

5.4.2 Scanner com duplo rotor^{Oliveira & Ferreira 2003}

O modelo eletromecânico para o *scanner* com duplo rotor, fig. 5.18, é similar ao modelo com um rotor, sendo sua parte elétrica exatamente a mesma, e sua componente mecânica alterada de forma a refletir a nova geometria. Nesta geometria, dois rotores, representados no modelo por J_{m1} e J_{m2} são conectados entre si por uma barra de torção, $k_{\theta3}$, e conectam-se individualmente à uma âncora através das barras $k_{\theta1}$ e $k_{\theta2}$. Cada rotor em seu movimento sofre a influência do atrito viscoso, b_1 e b_2 . O rotor 1 contém a bobina da armadura e o rotor 2 o espelho. O movimento da armadura no campo magnético externo, B_{dc} , gerado pelos ímãs permanentes, induz uma f.c.e.m.

¹⁵Condição para que o dispositivo seja modelado como um transformador ideal.

proporcional à velocidade angular da armadura e se contrapõe à tensão induzida na armadura pelo circuito atuador, $v_a(t)$.

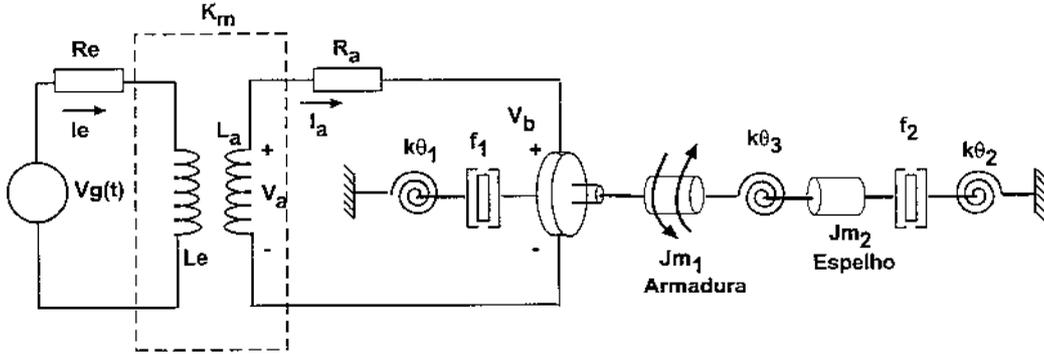


Figura 5.18: Modelo eletromecânico para o *scanner* com duplo rotor

A função de transferência, que para este dispositivo deve relacionar o ângulo de deflexão do espelho, θ_{r2} , e a tensão de entrada, $v_e(t)$, é obtida de maneira similar à do dispositivo com um rotor apresentado anteriormente. Igualando-se os torques reativo e indutivo, tem-se:

$$T_{mec}(t) = T_i(t)$$

Onde o torque reativo é obtido a partir do modelo mecânico da estrutura, apresentado na seção 5.2.7, dado por:

$$\begin{cases} J_{m1} \cdot \ddot{\theta}_{r1}(t) + k'_{\theta 1} \cdot \theta_1(t) + k_{\theta 3} \cdot \theta_2(t) = T_{mec}(t) \\ J_{m2} \cdot \ddot{\theta}_{r2}(t) + k'_{\theta 2} \cdot \theta_2(t) + k_{\theta 3} \cdot \theta_1(t) = 0 \end{cases} \quad (5.52)$$

O torque indutivo é o mesmo apresentado para o dispositivo com um rotor. Dado por:

$$T_i(s) = K_m \left(\frac{v_a(s) - K_b s \theta(s)}{R_a} \right) \quad (5.69)$$

Reescrevendo o sistema de equações do modelo dinâmico do *scanner*, eq. 5.52, em termos da variável complexa, s , e substituindo o torque indutivo, T_i , obtém-se um modelo para a resposta em frequência do *scanner* com duplo rotor:

$$\theta_2(s) = \frac{-B_{dc} k_{\theta 3} A^2}{R_a J_{m2}} \cdot \frac{v_a(s)}{[A \cdot s^4 + B \cdot s^3 + C \cdot s^2 + D \cdot s + E]} \quad (5.77)$$

onde

$$\begin{aligned}
A &= J_{m1} \cdot J_{m2} \\
B &= b_1 \cdot J_{m2} + b_2 \cdot J_{m1} \\
C &= J_{m1} \cdot k'_{\theta 2} + b_1 \cdot b_2 + J_{m2} \cdot k'_{\theta 2} \\
D &= k'_{\theta 1} \cdot b_2 + k'_{\theta 2} \cdot b_1 \\
E &= k'_{\theta 1} \cdot k'_{\theta 2} - k_{\theta 3}^2
\end{aligned}$$

Fazendo-se as considerações para o atuador forte e fracamente acoplado, obtém-se as funções de transferência do *scanner* com duplo rotor:

$$\frac{\theta_2(s)}{v_e(s)} = \left[\frac{-B_{dc} k_{\theta 3} A^2 M}{R_a J_{m2}} \right] \frac{s}{(As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E)} \frac{1}{(R_e + sL_e)} \quad (5.78)$$

Func. transf. scanner fracamente Acoplado

$$\frac{\theta_2(s)}{v_e(s)} = \left[\frac{-B_{dc} k_{\theta 3} A^2}{N_e R_a J_{m2}} \right] \frac{1}{(As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E)} \quad (5.79)$$

Func. transf. scanner fortemente Acoplado

Os modelos eletromecânicos apresentados possibilitam a obtenção de uma estimativa sobre o desempenho dos *scanners* com relação à frequência de ressonância dos modos torsionais e à deflexão dos dispositivos. Através desta estimativa são gerados os parâmetros geométricos necessários para definição dos modelos por elementos finitos, que serão descritos na seqüência do capítulo.

5.5 Modelo por elementos finitos

Nesta seção serão apresentados os modelos por elementos finitos mecânico estrutural e eletromagnético. Os modelos analíticos apresentados anteriormente nem sempre conseguem representar adequadamente os dispositivos reais, o que possui várias justificativas. Primeiramente, estes modelos consistem em simplificações dos dispositivos reais tridimensionais, de forma que a complexidade da geometria não é por eles contemplada. Outro fator relevante são as não-linearidades nas propriedades dos materiais utilizados. No modelo mecânico estas não-linearidades podem ser observadas, por exemplo, na variação do módulo de Young de acordo com o sentido da força aplicada (ortotropia), como acontece para o Si. A curva de histerese dos materiais ferromagnéticos representa uma não-linearidade presente no modelo eletromagnético do dispositivo. Embora existam formas de linearização destas propriedades para utilização em modelos analíticos, este não foi o objetivo deste trabalho. Optou-se aqui por utilizar pacotes computacionais prontos que pudessem representar adequadamente os dispositivos eletromecânicos propostos, e que pudessem ser incorporados à metodologia de projeto.

O método dos elementos finitos^{Bathe 1982} foi escolhido como ferramenta computacional para descrever os dispositivos, por estar bem estabelecido para simulação de sistemas mecânicos e eletromagnéticos, e eletromecânicos acoplados.

O *software* adotado foi o ANSYS[®]v7.0,^{ANSYS 5.0 User's Manual - Procedures 1998} por possibilitar tanto a importação da geometria gerada em outros softwares de CAD (AutoCad[®], por exemplo) como por possibilitar a utilização de *scripts*, para programação das simulações.

Neste trabalho as simulações foram realizadas utilizando a linguagem APDL, linguagem de descrição de comando do ANSYS[®], desde a descrição da geometria, até a etapa de pós-processamento para extração dos resultados. A utilização da linguagem APDL conferiu grande flexibilidade ao processo de modelagem, possibilitando a parametrização total dos modelos mecânico e elétrico. No apêndice A são mostrados exemplos de programas utilizados nas simulações estrutural modal e eletromagnética. A seguir será apresentada a metodologia empregada na modelagem por elementos finitos.

5.5.1 Estrutural

A análise estrutural realizada através da análise modal,^{Mark H. Richardson 1999} teve o objetivo de determinar a frequência e as formas de vibração da estrutura, de forma a sintonizar os modos torsionais para a frequência de operação desejada, e ao mesmo tempo isolar os outros modos para

eliminação dos modos cruzados e melhoria do desempenho do dispositivo.

Os modelos discretizados para as estruturas com um e dois rotores são apresentadas abaixo:

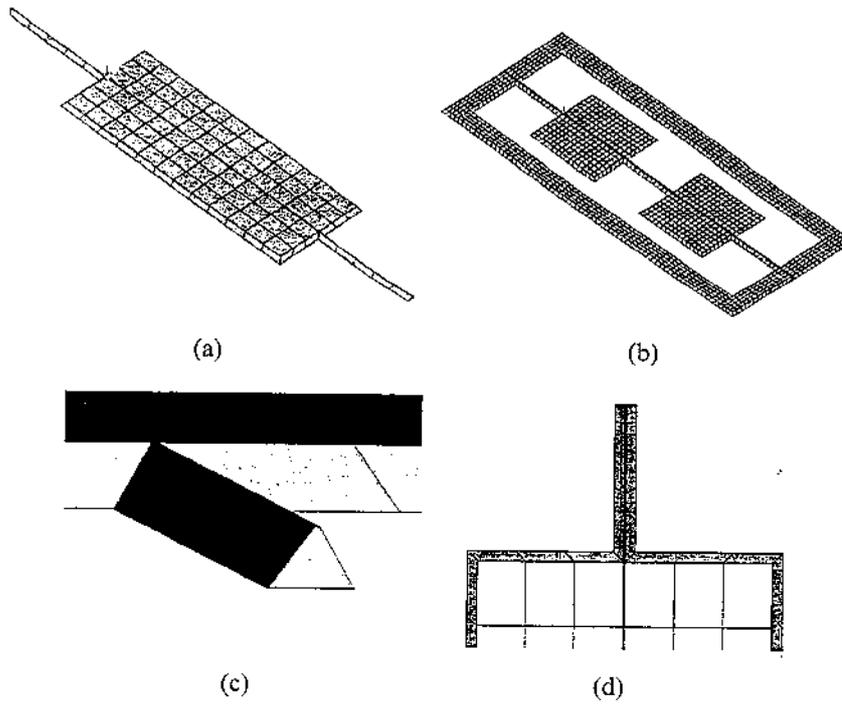


Figura 5.19: Modelo estrutural discretizado para os dispositivos com: (a) Único rotor, (b) duplo rotor (c) Detalhe da barra de torção com perfil trapezoidal (d) Detalhe da inclinação das paredes devido ao processo de corrosão.

A fig. 5.19 apresenta a malha utilizada no modelo dos dispositivos em Si. Como pode ser observado nas fig. 5.19(c) e 5.19(d) a inclinação de 54.74° nas paredes da estrutura devido ao processo de usinagem química foi considerada no modelo.

A malha utilizada nos dispositivos em Bronze-fosforoso é apresentada na fig. 5.20.

Os elementos utilizados no modelo são hexaedros compostos por oito nós, cada um com três graus de liberdade translacionais: UX, UY e UZ. No ANSYS® este elemento é o SOLID45. ANSYS 5.0 User's Manu

O nível de refinamento da malha foi determinado com base no tamanho dos elementos na barra de torção. Esta escolha é justificada pois estes elementos estão sujeitos às maiores tensões e deformações nos modos de vibração de interesse, os torsionais. A malha foi refinada até que os valores obtidos pela análise modal convergissem. A fig. 5.21 mostra a convergência na frequência do 1º modo torsional em 4 para os dispositivos fabricados em Bronze-fosforoso.

As propriedades dos materiais utilizados nas simulações são apresentados na tab. 5.6. O módulo de Young no Silício varia de acordo com a orientação dos planos cristalinos, entretanto, neste

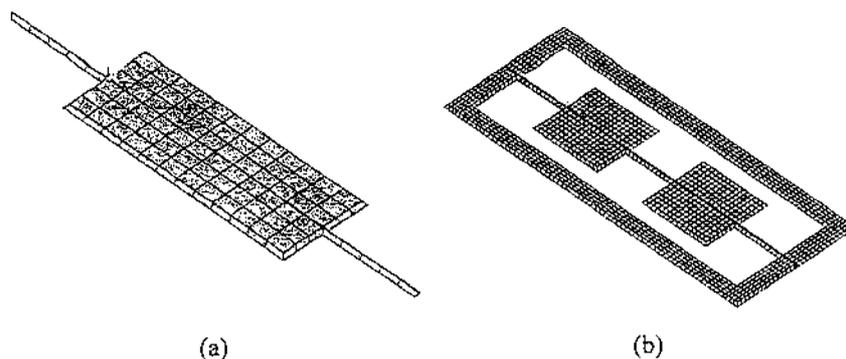


Figura 5.20: Modelo elementos finitos estrutural *scanners* em Bronze-fosforoso. (a) 70 Hz, (b) 4 KHz

estudo o material foi considerado isotrópico. Para os dispositivos em Si, foi considerada a inclinação nas paredes de 54.7° devido ao processo de corrosão anisotrópico.

Tabela 5.6: PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS.

	SILÍCIO	BRONZE FOSFOROSO
Densidade específica [Kg/m³]	2330	8800
Módulo de Young [GPa]	112	110
Constante de Poisson	0.28	0.341
Ângulo de corrosão	54.74°	90°

A seguir será apresentado o modelo eletromagnético por elementos finitos dos atuadores forte e fracamente acoplados.

5.5.2 Eletromagnético

A simulação eletromagnética foi realizada para obtenção de uma estimativa dos campos AC e DC na região da armadura, bem como da tensão induzida na armadura. O modelo para os atuadores forte e fracamente acoplados são mostrados abaixo:

A análise eletromagnética no ANSYS[®] é realizada através da discretização das equações de Maxwell no espaço-tempo, sendo que o grau de liberdade primário é o potencial magnético ou o fluxo, dependendo da formulação escolhida. Todas as demais variáveis são calculadas a partir destas. Dependendo do elemento escolhido o grau de liberdade primário pode ser o potencial magnético vetorial, escalar ou o fluxo nas bordas do elemento. Anslys 50 User's Manual - Theory Reference 1998

Para o problema do atuador eletromagnético, devido à presença de entreferros, ímãs permanentes e acoplamento indutivo, escolheu-se a formulação baseada no potencial vetorial magné-

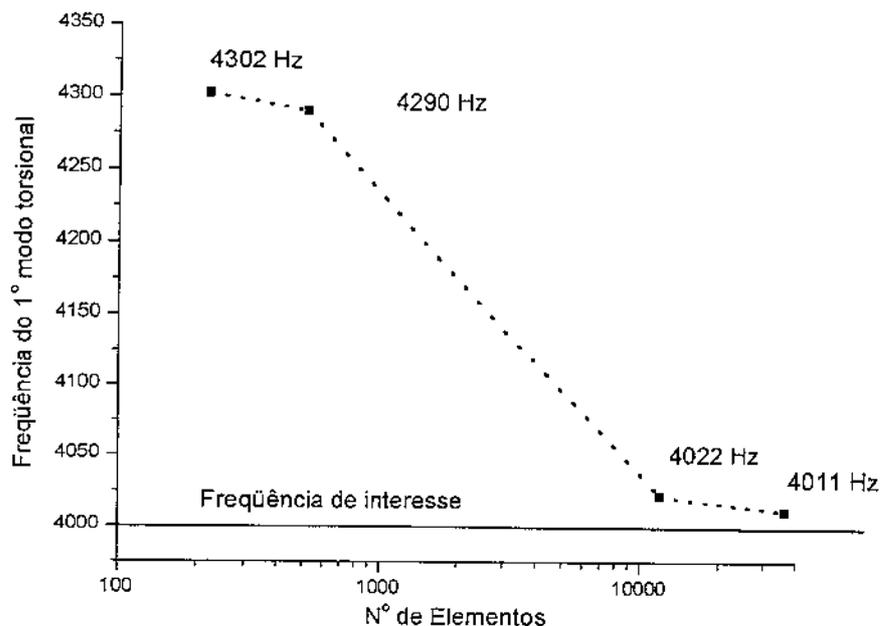


Figura 5.21: Convergência no valor da frequência do primeiro modo torsional para os dispositivos em Bronze-fosforoso 4KHz

tico, *Ansys 50 User's Manual - Theory Reference 1998* MVP, por ser a única a possibilitar uma análise completa do problema, partindo da tensão alternada aplicada ao estator e chegando à tensão induzida na armadura e ao torque gerado.

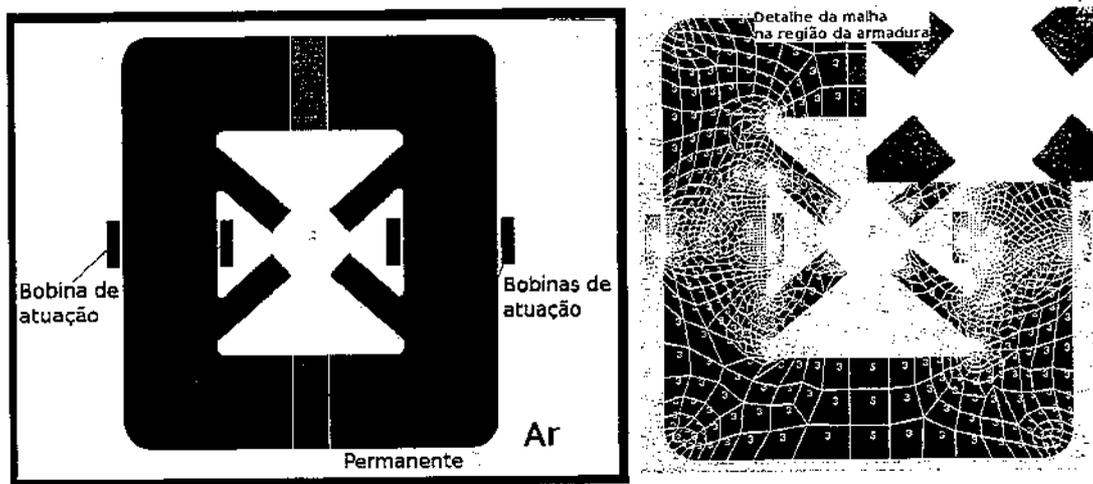
As propriedades dos materiais utilizados no modelo, bem como detalhes dos modelos eletromagnéticos são mostrados na tab. 5.7

Tabela 5.7: PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS.

	AÇO-SILÍCIO	FERRITE
Permeabilidade linear μ_r - 60Hz	40000	900
Permeabilidade linear μ_r - 4000Hz	900	2000
Resistividade [Ohm · m]	$8 \cdot 10^{-8}$	Não considerada

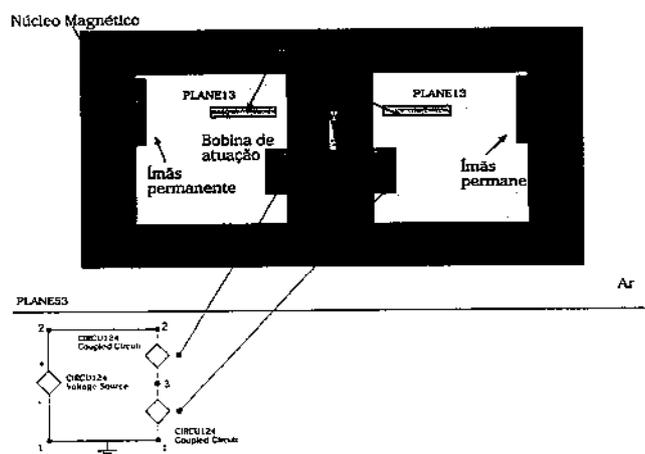
Nas simulações realizadas foi suposto que os dispositivos operam longe da região de saturação da curva BH, de forma que este efeito não foi introduzido no modelo. As correntes parasitas também não foram consideradas devido ao isolamento elétrico proporcionado pelo verniz nas lâminas de aço-silício utilizado e à elevada resistividade da ferrite.

Três tipos de análise foram realizadas, uma análise magnetostática, para análise do campo magnético gerado pelos ímãs permanentes, uma análise harmônica, para previsão do campo alternado

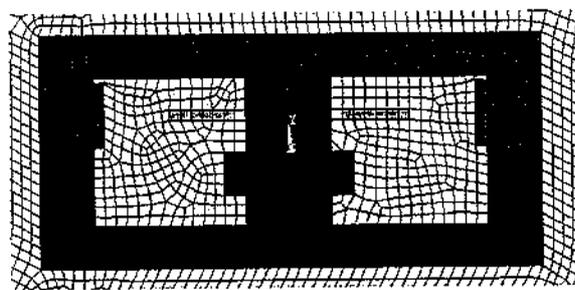


(a)

(b)



(c)



(d)

Figura 5.22: Modelo eletromagnético do atuador: (a) Fracamente acoplado, (b) fortemente acoplado.

proporcionado pelas bobinas de atuação e tensão induzida na armadura. A análise no domínio do tempo, ou transiente, foi implementada por possibilitar a análise do torque gerado na armadura.

A malha foi refinada na região de interesse, ou seja, na região próxima à armadura, e nas regiões sujeitas a saturação, como nos cantos do caminho magnético. O tamanho mínimo da malha foi tomado em relação ao tamanho da armadura e para os parâmetros apresentados houve convergência dos resultados.

5.6 Roteiro de projeto

Com base nos modelos previamente apresentados foi proposto um roteiro para projeto dos *scanners* indutivos, que será apresentado a seguir.

1. Especificar os parâmetros de desempenho frequência de operação e ângulo de deflexão mecânico;
2. De acordo com as especificações decidir se o dispositivo possuirá:
 - a) 1 rotor;
 - b) 2 rotores;
3. De acordo com as especificações decidir se o dispositivo será:
 - c) Fraca ou
 - d) Fortemente acoplado;
4. Obter uma estimativa da constante de rigidez das barras de torção a partir dos gráficos 5.23 ou 5.24;
5. Obter uma previsão da frequência de ressonância do dispositivo através:
Da equação (5.33) para o dispositivo com um rotor;
Da equação (5.38) para o dispositivo com dois rotores;
6. Para o dispositivo com 1 rotor pode-se verificar os modos não torsionais através das equações (5.16), (5.17) e (5.18);
7. Utilizar os modelos eletromecânicos para previsão do comportamento dinâmico do dispositivo;
8. A partir dos parâmetros geométricos obtidos utilizar a análise modal por elementos finitos para obtenção dos modos de vibração e ajuste fino da estrutura do dispositivo.

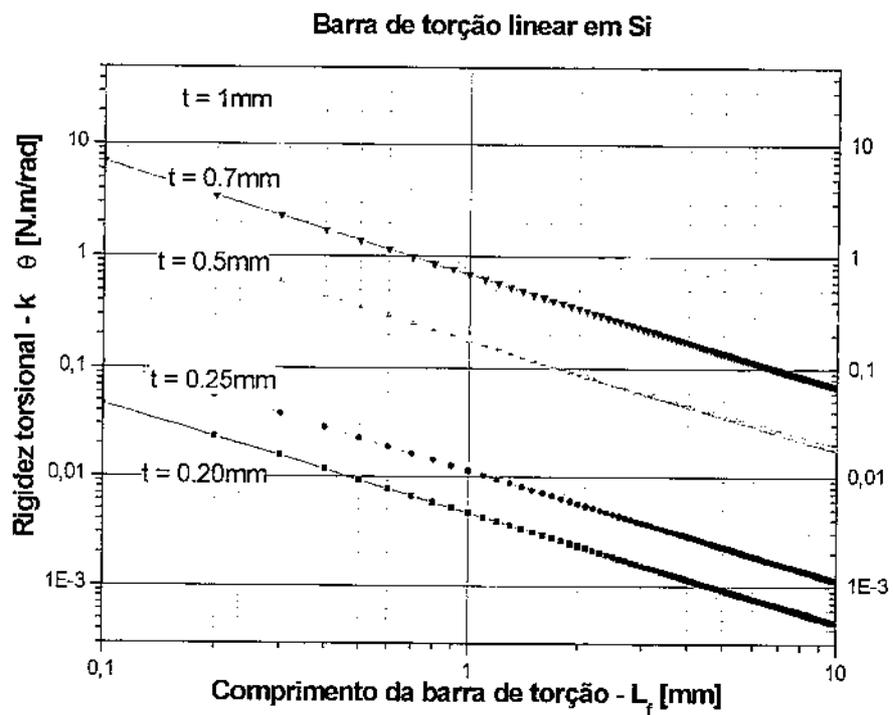


Figura 5.23: Rigidez torsional da barra de torção linear em Si. Perfil triangular

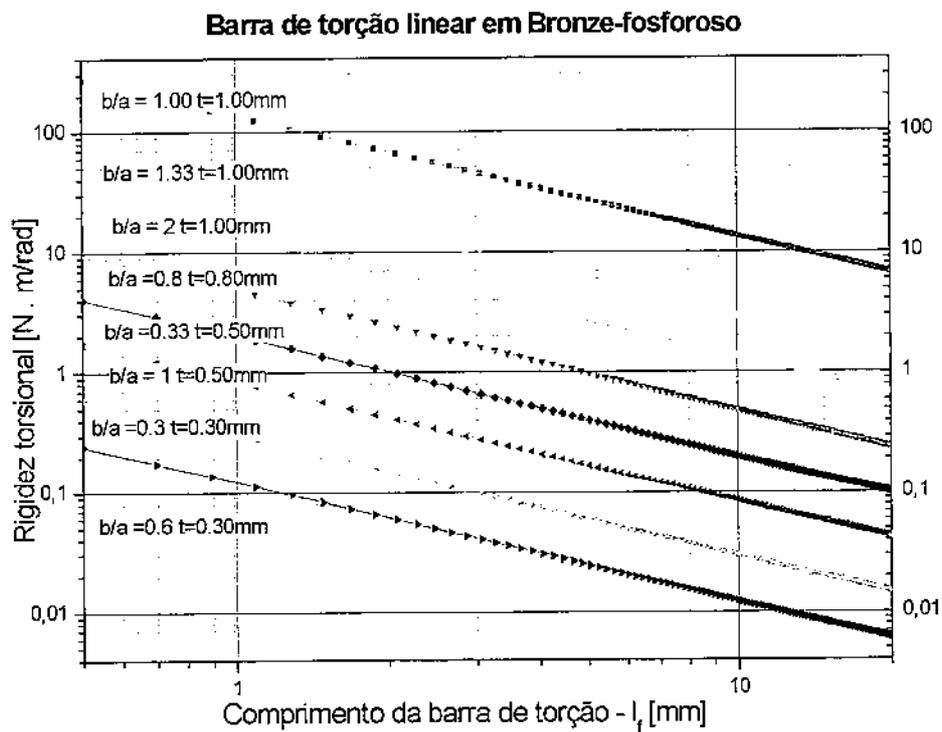


Figura 5.24: Rigidez torsional da barra de torção linear em Bronze-fosforoso. Seção retangular.

5.7 Sumário

Neste capítulo foram apresentados os modelos desenvolvidos para o *scanner* indutivo. Os modelos analíticos dos fenômenos elétrico e mecânico foram apresentados, bem como o modelo eletromecânico por parâmetros concentrados. Esta abordagem, apesar de nem sempre ser totalmente válida para dispositivos reais, com geometrias complexas e propriedades dos materiais utilizados, mostrou-se útil para o entendimento do funcionamento do dispositivo, bem como dos fatores que influenciam em seu desempenho.

Visando prever os parâmetros de desempenho dos dispositivos fabricados, foram desenvolvidos modelos baseados no método dos elementos finitos. Tais modelos permitem a inclusão de não-linearidades, bem como a modelagem de geometrias mais complexas.

Para finalizar, foi apresentada uma metodologia para projeto dos dispositivos. Esta metodologia torna possível o projeto dos *scanners* indutivos a partir dos requerimentos de desempenho e condições de atuação.

No próximo capítulo serão apresentados os dispositivos fabricados utilizando os materiais, métodos e processos descritos anteriormente.

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados mais relevantes deste trabalho obtidos a partir das contribuições propostas nos capítulos anteriores. Os resultados foram organizados de forma que em cada seção fosse apresentado o resultado de pelo menos uma contribuição. Inicialmente é apresentado o dispositivo com duplo rotor. Em seguida apresentam-se os dispositivos de baixa (60 Hz) e alta (4 kHz) frequências fabricados em Bronze-fosforoso através dos processos de fabricação descritos no capítulo 4. Na seqüência, é apresentado o atuador fortemente acoplado juntamente com as vantagens representadas por esta contribuição. A aplicação da metodologia de projeto proposta no capítulo 5 a dispositivos com um e dois rotores é apresentada na seqüência. Por fim é apresentada a validação dos modelos por elementos finitos estrutural e mecânico e alguns fenômenos observados experimentalmente e não previstos pelo modelo.

6.1 Arranjo experimental para caracterização dos *scanners*

Os *scanners* desenvolvidos nesta tese foram caracterizados através do levantamento de propriedades dinâmicas como resposta em frequência, curva de relaxação e linearidade, e ainda, para o *scanner* com duplo-rotor em Si, através da identificação modal experimental por vibrometria laser Doppler.

A caracterização dinâmica dos *scanners* foi realizada através de excitação controlada e medição da posição do feixe defletido pelo dispositivo em teste. A partir da posição do feixe no tempo foram obtidos parâmetros como velocidade, frequência, entre outros.

O arranjo experimental utilizado pode ser subdividido em dois sistemas distintos; sistema óptico, com componentes responsáveis pela fixação da instrumentação e alinhamento e posicionamento do feixe laser; e sistema eletrônico, responsável pela geração do sinal elétrico de excitação dos *scanners* e pela aquisição, gravação e processamento dos sinal de resposta dos *scanners*.

O subsistema óptico foi implementado utilizando uma solução padrão da *Newport*, composta por uma mesa para fixação de componentes ópticos, e componentes diversos para fixação da instrumentação, como carros deslizantes translacionais, carros deslizantes rotacionais, suportes diversos, entre outros. A fonte de radiação laser utilizada foi um diodo com potência menor que 5 mW e radiação vermelha na faixa de 680 nm. A fig. 6.1, mostra o sistema óptico utilizado.

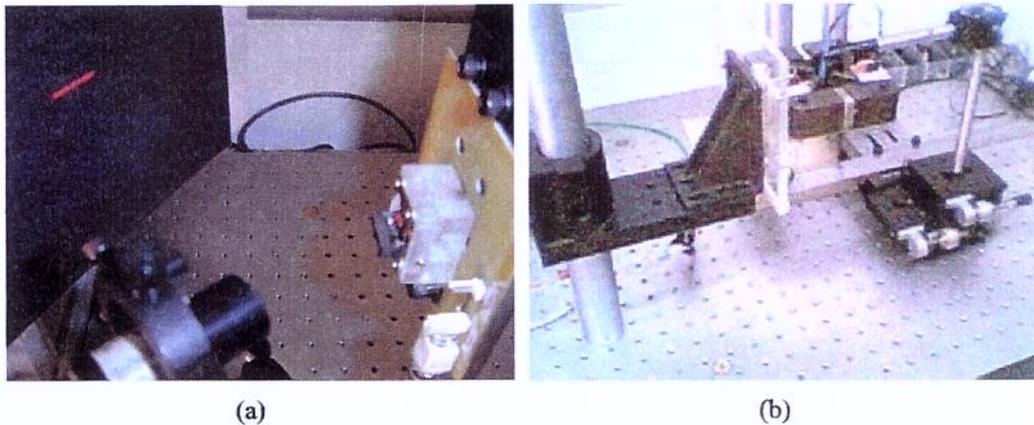


Figura 6.1: Sistema óptico utilizado para fixação e alinhamento da instrumentação utilizada para caracterização dos *scanners*.

No subsistema eletrônico foram utilizados geradores de sinais, fontes de tensão, e um osciloscópio digital de quatro canais, interligados a um microcomputador através de uma placa de interface do tipo GPIB (*General Purpose Interface Board*). O controle e automatização dos testes foi implementada utilizando o programa *VEE Pro*[®], que permite, além da, manipulação, armazenagem

e controle das medidas realizadas pelos instrumentos ligados ao microcomputador, a criação de interfaces gráfica para cada tipo de teste, o que agiliza e torna o processo de caracterização menos sujeito a falhas.

O elemento principal do sistema de caracterização dinâmica é o sensor de posição, ou PSD (Position Sensor Detector). Sua função é receber o ponto luminoso defletido pelo *scanner* e converter sua posição em um valor de tensão que pode ser medido, por exemplo, pelo osciloscópio. O PSD é formado pelo elemento foto-sensor e um circuito para condicionamento do sinal. O elemento foto-sensor utilizado no instrumento foi um foto-diodo modelo S39, com dimensões 39×3 mm, da Hamamatsu®. Ao incidir na janela do sensor, o feixe luminoso gera, em cada um de seus dois terminais de ânodo, uma corrente que é proporcional à sua distância do centro da janela. O circuito condicionador de sinais, lê estes dois valores e os transforma em um sinal entre 0 e 10 volts, referente à incidência do feixe na janela do sensor. O circuito condicionador de sinais utilizado foi projetado durante o trabalho de doutorado de Ferreira 1994, e mostrou-se funcional para medidas em altas e baixas frequências.

O arranjo experimental para realização das medidas é ilustrado na fig. 6.1. Neste arranjo, o *scanner* (4) é atuado por indução através do atuador eletromagnético (3), o sinal de controle do atuador é enviado pela instrumentação (6), controlada através do microcomputador (7) e seus parâmetros (frequência e amplitude) são controlados via programa de controle. O feixe laser é gerado pelo diodo laser (2), é defletido pelo *scanner* (4) e sua posição é medida pelo PSD (1). O sinal de saída do PSD é medido pela instrumentação (6), sendo em seguida tratado e armazenado de acordo com o programa de controle. Toda esta operação é realizada em tempo real.

Como os ensaios realizados para caracterização dos *scanners* seriam os mesmos, foram desenvolvidos uma série de programas para automatização das medidas, conforme o ensaio a ser realizado. Este procedimento tem o objetivo de simplificar os procedimentos de caracterização, e reduzir a incidência de erros nas medidas.

Por estes programas, o usuário deve somente posicionar e alinhar o dispositivo em testes, o Laser e o sensor de posição adequadamente, e informar ao programa os parâmetros de cada ensaio. Feito isso, o próprio programa controla a instrumentação e realiza as medidas, mostrando os resultados em tempo real no monitor, para que o usuário possa verificar se os valores estão dentro de um intervalo esperado.

Na caracterização dinâmica dos *scanners*, os seguintes ensaios foram realizados:

Resposta em frequência: Aplicação de uma tensão de acionamento senoidal com amplitude mantida constante e variação de sua frequência. Mede-se a amplitude e a fase da defle-

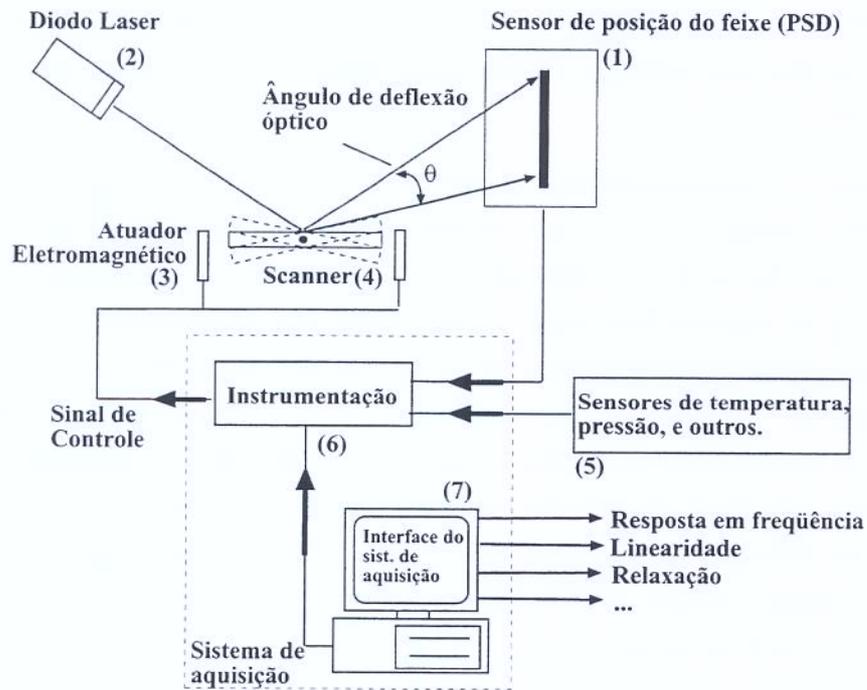


Figura 6.2: Arranjo experimental para realização da caracterização do *scanners* .

xão do espelho. Tem o objetivo de identificar e caracterizar os modos de vibração do dispositivo;

Linearidade: Aplicação de uma tensão de acionamento senoidal com amplitude variável em rampa e frequência fixa. Mede-se a amplitude de deflexão do espelho. Tem o objetivo de estudar o comportamento da saída do sistema em relação à entrada, em apenas uma frequência.

Relaxação: Aplicação de uma tensão de acionamento senoidal com amplitude e frequência constantes durante um intervalo de tempo e desligamento abrupto desta excitação. Mede-se o decaimento da deflexão com o tempo. Tem o objetivo de estudar o amortecimento do dispositivo;

Estabilidade: Coloca-se o dispositivo operando na ressonância com a frequência e amplitude de acionamento mantidas fixas durante um período de, no mínimo, uma semana. Mede-se a resposta do sistema, amplitude e frequência de oscilação, e a temperatura em intervalos regulares. Tem o objetivo de estudar a estabilidade mecânica do dispositivo em operação, e a influência da temperatura em seu desempenho. Por este ensaio pode-se ter uma idéia se o material sofre fadiga durante o período de funcionamento.

6.2 Scanner com duplo rotor Oliveira & Ferreira 2003

O *scanner* com duplo rotor fabricado em Si é mostrado na fig. 6.3(a). O dispositivo, usinado em Si monolítico, é composto por dois rotores quadrados, um com o espelho e outro com a bobina da armadura, conectados entre si por três barras de torção de mesmo tamanho. As dimensões dos dispositivos são apresentadas na tab. 6.1.

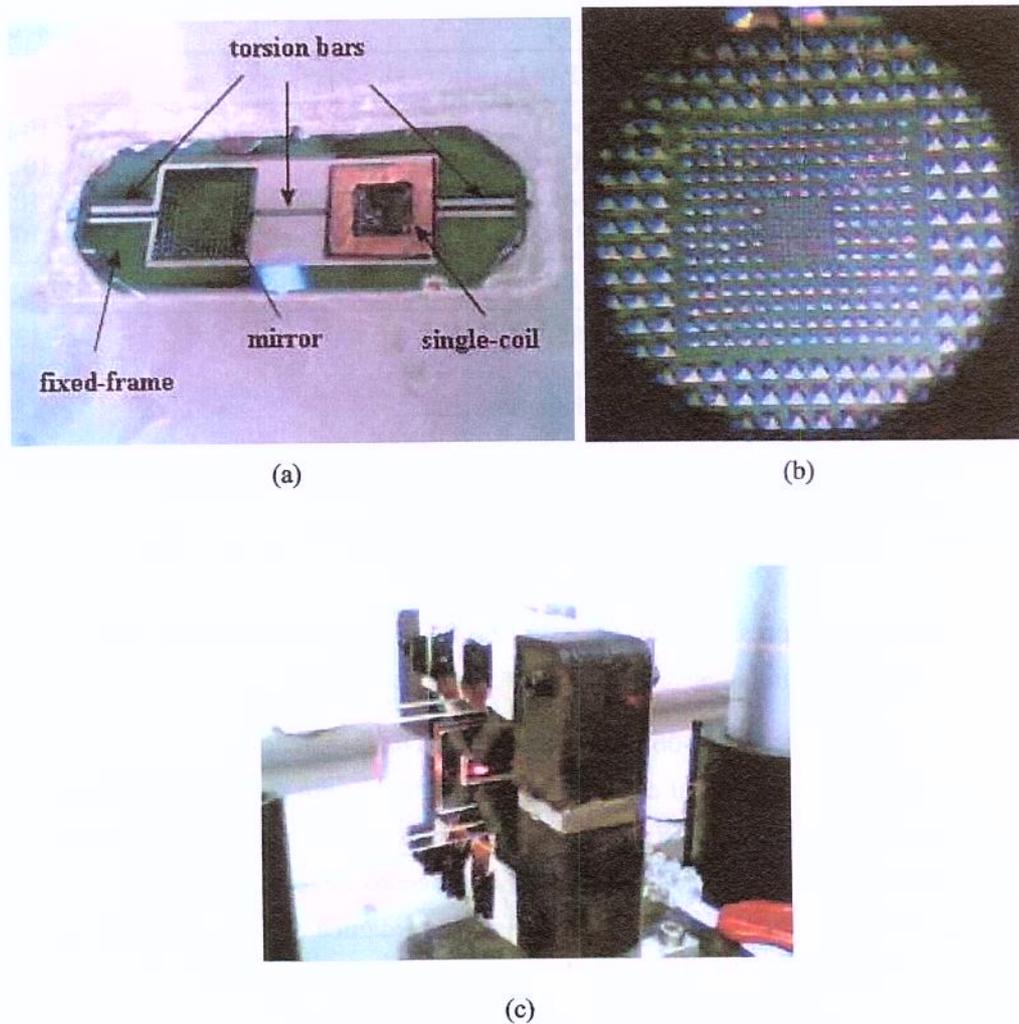


Figura 6.3: *Scanner* indutivo com duplo rotor fabricado em Si. (a) *Scanner* com duplo rotor em Si, (b) Detalhe do padrão de furos piramidais usinados nas costas do espelho para redução da inércia e (c) Dispositivo posicionado no atuador.

Na fabricação do *scanner* em Si foi utilizada uma alternativa ao processo Si-LIG descrito anteriormente. Problemas com a limpeza das lâminas de Si inviabilizaram a foto-gravação e eletroformação da bobina de atuação em Ouro, conforme indicado no processo Si-LIG. Alternativamente fabricou-se uma bobina em um substrato de fibra de vidro, PCB, utilizado comumente na tecno-

Tabela 6.1: DIMENSÕES, PARÂMETROS FÍSICOS E DE DESEMPENHO DO SCANNER COM DUPLO-ROTOR EM SI.

DIMENSÕES	
TAMANHO TOTAL [mm^2]	23×8.5
ESPELHO	5.0×5.0
ARMADURA	5.0×5.0
COMPRIMENTO BARRAS DE TORÇÃO [mm]	4
LARGURA BARRAS DE TORÇÃO (TOPO) [mm]	0.1
ESPESSURA DA LÂMINA [mm]	0.2
PARÂMETROS FÍSICOS ^a	
INÉRCIA DO ESPELHO [Kgm^2]	2.417×10^{-11}
INÉRCIA DA ARMADURA [Kgm^2]	2.417×10^{-11}
CONSTANTE DE RIGIDEZ DAS BARRAS DE TORÇÃO [Nm/rad]	1.208×10^{-3}
COEFICIENTE DE ATRITO VISCOSO ^b	1.99×10^{-9}
PARÂMETROS DE DESEMPENHO	
FREQÜÊNCIA 1° MODO TORSIONAL [Hz]	1316
FATOR DE QUALIDADE 1° MODO TORSIONAL	347
FREQÜÊNCIA 2° MODO TORSIONAL [Hz]	2542
FATOR DE QUALIDADE 2° MODO TORSIONAL	422

^aCalculados a partir das equações apresentadas no capítulo 5

^bEstimado a partir do fator de qualidade do dispositivo para o primeiro modo torsional.

logia de circuitos impresso, com espessura de $300\mu m$. Esta bobina foi posteriormente colada à estrutura em Si com um adesivo de uso geral.

A alternativa ao processo de foto-gravação e eletroformação para adição da armadura ao *scanner* utilizada, embora artesanal e inviável para fabricação em escala, pode ser pensada como parte do processo de fabricação de *scanners* em materiais não condutores previamente usinados. Para que esta alternativa seja viável, entretanto, o processo deve ser mecanizado e faz-se necessário um estudo de adesivos que propiciem boa rigidez mecânica ao conjunto, para evitar problemas de desbalanceamentos^{Marshall 2004} pelo mal posicionamento da armadura.

Para demonstrar a flexibilidade da utilização do duplo-rotor, uma matriz de furos piramidais, com três diferentes tamanhos, $100\mu m$, $50\mu m$ e $5\mu m$ foi usinada nas costas do espelho por corrosão anisotrópica, fig. 6.3(b). Esta estrutura é um exemplo de como a geometria do espelho pode ser alterada de forma a reduzir sua inércia e melhorar a razão torque-inércia do dispositivo¹, aumentando sua freqüência de ressonância sem comprometimento do ângulo de deflexão.

¹A razão torque-inércia de um espelho é uma figura de mérito do *scanner* que relaciona o torque, necessário para o alcance de elevadas freqüências de ressonância, com a inércia, inversamente proporcional ao ângulo de deflexão. Quanto maior esta relação, maior a deflexão óptica do dispositivo em altas freqüências.

O comportamento dinâmico do dispositivo foi obtido a partir de sua resposta em frequência. A fig. 6.4 apresenta a resposta em frequência dos dois principais modos torsionais e na tab. 6.1 são apresentados os principais parâmetros de desempenho do *scanner* com duplo-rotor.

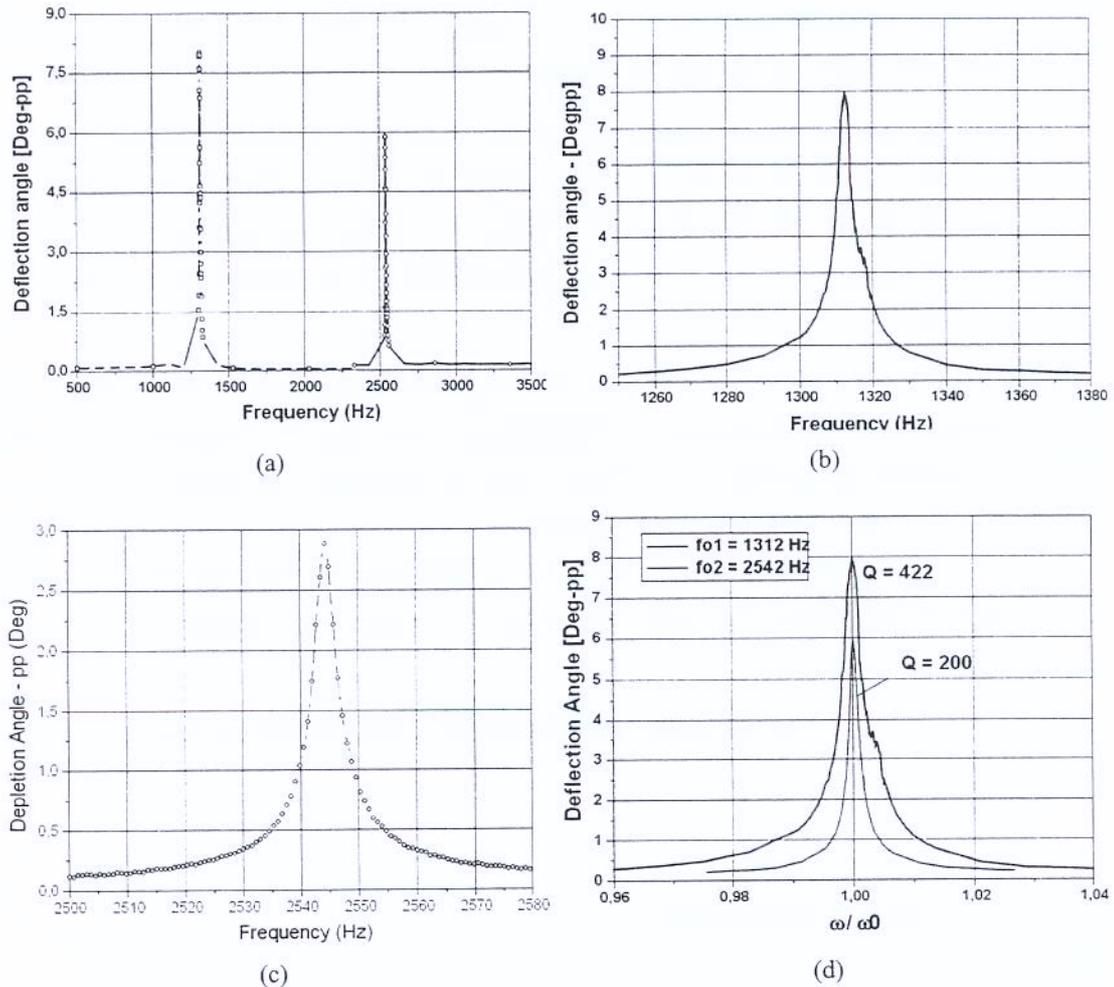


Figura 6.4: Caracterização dinâmica do *scanner* . (a) Resposta em frequência, (b) Primeiro modo torsional em 1311Hz,(c) Segundo Modo torsional em 2542 Hz, (d) Fator de qualidade

A seguir, serão apresentados os resultados da utilização do Bronze-fosforoso como material estrutural.

6.3 Bronze-fosforoso como material estrutural

A liga de Bronze-fosforoso é composta por Cobre, Estanho e Fósforo. Devido às suas excelentes propriedades físicas e mecânicas é empregada em molas, instrumentos de medição e equipamentos sujeitos elevados ciclos de tensão. Por não possuir materiais ferrosos em sua composição este material é de especial interesse para fabricação de *scanner* ressonantes indutivos.

Alguns dos dispositivos fabricados em Bronze-fosforoso são mostrados nas fig. 6.5(b) e 6.5(a). As frequências de operação foram escolhidas conforme valores utilizados em sistemas de projeção de imagens.^{Urey 2002, Ko 2006} Frequência de 60 Hz, valor típico para varredura vertical em sistemas de projeção de imagens, e 4 kHz, metade da frequência de varredura horizontal de sistemas no formato QVGA^{Urey 20022}.

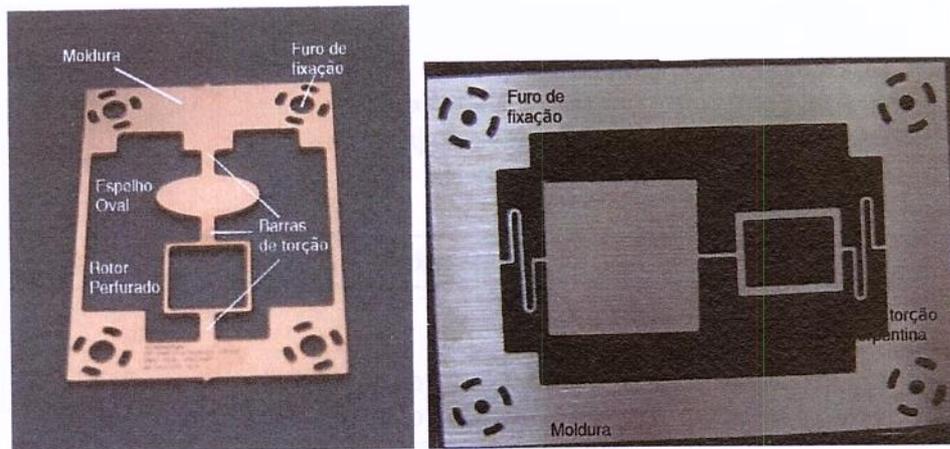
Na fig. 6.5(c) é apresentado um lote dos dispositivos fabricados pelo processo de usinagem química apresentado anteriormente. A flexibilidade deste processo, demonstrada através das diferentes geometrias propostas, fig. 6.5(d), o fato do dispositivo ser planar, e o fato da armadura estar integrada à parte estrutural, representam vantagens desta tecnologia, em comparação com as disponíveis anteriormente. Adicionalmente, a facilidade na manipulação dos dispositivos que se contrapõe à fragilidade dos dispositivos em Si constitui uma vantagem do ponto de vista da montagem.

Na sequência serão apresentados os resultados da caracterização dos dispositivos pelos ensaios descritos.

6.3.1 *Scanner* ressonante de 60 Hz

O *scanner* para operação em 60 Hz é mostrado nas fig. 6.5(b). Para obtenção desta frequência de operação foi necessário a utilização de barras de torção em forma de serpentina, conforme apresentado no capítulo 5. Esta geometria possibilita a obtenção de baixas constantes torsionais sem um acréscimo significativo na área do dispositivo. Entretanto, a rigidez na direção paralela ao plano do dispositivo não é tão grande quanto para as barras de torção lineares, o que faz com que estes modos planos apresentem frequência de operação da mesma ordem das frequências no modo torsional. Como consequência, o projeto destes dispositivos é mais crítico e requer a utilização de modelos por elementos finitos para uma previsão mais acurada dos modos de vibração.

²O valor de 8 kHz não foi escolhido devido a maior complexidade em seu projeto, e porque o objetivo deste trabalho não foi o de desenvolver um sistema de projeção de imagens, e sim viabilizar a fabricação de *scanners* com diferentes materiais e tecnologias

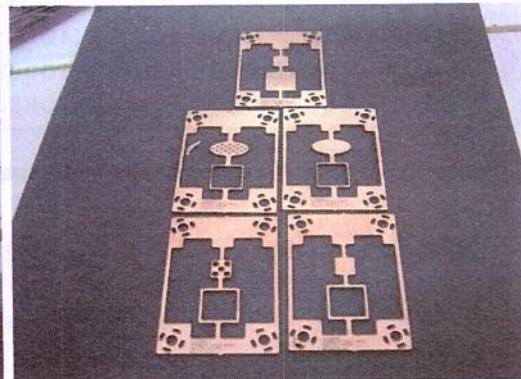


(a)

(b)



(c)



(d)

Figura 6.5: *Scanners* em Bronze-fosforoso. (a) Scanner 4kHz, (b) Scanner 60Hz, (c) Lote de dispositivos, (d) Diferentes geometrias fabricadas

As dimensões do dispositivo fabricado juntamente com os parâmetros de desempenho obtidos experimentalmente encontram-se na tab. 6.2.

Tabela 6.2: SCANNER FABRICADO EM BRONZE-FOSFOROSO - 60HZ

DIMENSÕES	
TAMANHO TOTAL [mm^2]	69×49
ESPELHO	20×20
ARMADURA	14×11
COMPRIMENTO BARRA DE TORÇÃO CENTRAL [mm]	5
LARGURA BARRAS DE TORÇÃO [mm]	0.3
BARRAS DE TORÇÃO EM SERPENTINA - LP [mm]	1.3
BARRAS DE TORÇÃO EM SERPENTINA - LO [mm]	12
BARRAS DE TORÇÃO EM SERPENTINA - N	1
ESPESSURA DA CHAPA [mm]	0.5
PARÂMETROS FÍSICOS ^a	
INÉRCIA DO ESPELHO [Kgm^2]	5.87×10^{-8}
INÉRCIA DA ARMADURA [Kgm^2]	3.28×10^{-9}
CONSTANTE DE RIGIDEZ DAS BARRAS DE TORÇÃO LINEAR [Nm/rad]	2.10×10^{-3}
CONSTANTE DE RIGIDEZ DAS BARRAS DE TORÇÃO - SERPENTINA [Nm/rad]	7.16×10^{-6}
PARÂMETROS DE DESEMPENHO	
FREQÜÊNCIA 1° MODO TORSIONAL [Hz]	64.4
FREQÜÊNCIA 2° MODO TORSIONAL [Hz]	65.5
FATOR DE QUALIDADE 1° MODO TORSIONAL	200
FATOR DE QUALIDADE 2° MODO TORSIONAL	50

^aCalculados a partir das equações apresentadas no capítulo 5

Os gráficos com os resultados dos ensaios experimentais são mostrados na fig. 6.6.

A resposta em frequência, fig. 6.6(a), mostra claramente a ocorrência de dois modos de vibração bem próximos, o primeiro em 64.4 Hz torsional, e o segundo em 65.5 Hz fletor. O fator de qualidade encontrado para estes modos foi de 200 e 50, respectivamente, conforme observado na fig. 6.6(b). Estas ressonâncias relativamente próximas encontradas deve-se à proximidade entre os modos. Experimentalmente, observou-se que o dispositivo oscila numa superposição destes dois modos. Este fenômeno inviabiliza o dispositivo por introduzir distorções na forma de onda do feixe de varredura e deve ser resolvido através de um projeto minucioso, ou da utilização de outras geometrias para as barras de torção, de modo que o modo torsional possa ser isolado dos demais. A barra em serpentina rotacionada^{Barillaro 2005} é uma possível alternativa para solução do problema³.

Na fig. 6.6(c) é mostrada a relação fortemente não-linear entre o ângulo de deflexão e a ampli-

³A barra em serpentina rotacionada de 90° possui maior rigidez no sentido longitudinal ao comprimento da barra, o que aumenta a separação entre o modo fletor e torsional.

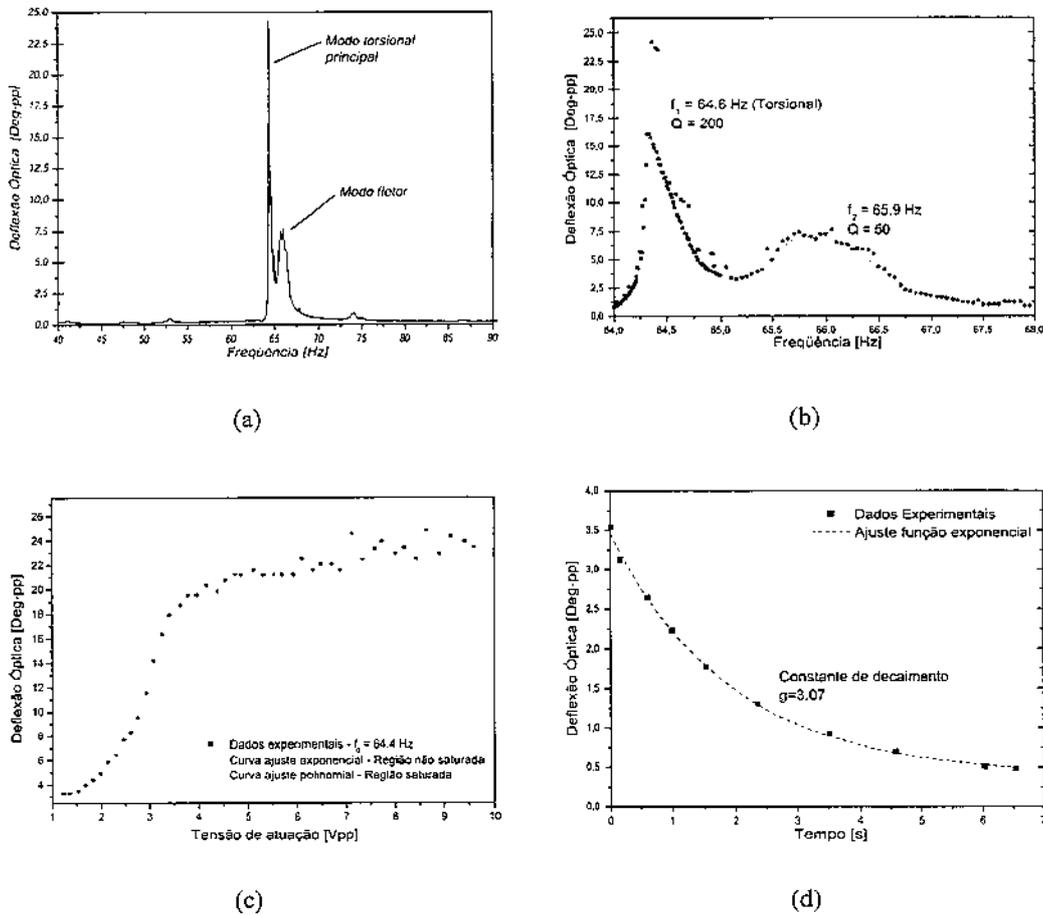


Figura 6.6: Caracterização dinâmica do *scanner* ressonante em Bronze-fosforoso operando em 60Hz. (a) Resposta em frequência, (b) Ajuste da resposta em frequência para obtenção de Q e f_0 , (c) Relação tensão-deflexão óptica, (d) Curva de relaxação.

tude da tensão de entrada para este dispositivo. Esta relação é típica de um fenômeno de saturação, pois após um determinado valor de tensão (3.5 Vpp, no caso), o ângulo de deflexão tende a se estabilizar. Como explicado anteriormente, o ângulo de deflexão é determinado basicamente por três variáveis⁴: torque induzido, constante de rigidez torsional e atrito viscoso. Destas, a constante de rigidez e o atrito viscoso podem ser consideradas invariáveis com a amplitude do movimento, pois o dispositivo opera no regime de pequenas amplitudes (Ângulo mecânico $\approx 10^\circ$), podendo ser considerada constante,^{Miyajima 2005} e não existe nenhuma superfície próxima ao dispositivo que possa alterar o amortecimento viscoso.^{Pan 1998}

Assim, resta a hipótese da não-linearidade devida ao torque indutivo. Como descrito ante-

⁴Desconsiderando-se qualquer variação no momento de inércia da estrutura com o tempo ou amplitude do movimento.

riormente, o torque é proporcional à corrente induzida na armadura, e esta corrente relaciona-se de forma complexa com a tensão de atuação aplicada ao dispositivo. Alguns fatores que podem isoladamente, ou em conjunto relacionar-se à não-linearidade observada:

- Saturação do núcleo magnético. Neste caso, o fluxo magnético no núcleo, B , e conseqüentemente a tensão induzida na armadura (secundário), não responde mais a um aumento da corrente no primário. Como resultado, a partir de um determinado patamar o torque tende a se estabilizar;
- A assunção de que o atuador comporta-se como um transformador ideal não é válida. Neste caso, a tensão induzida na armadura não seria senoidal, o que se refletiria em uma série de harmônicos, que se reproduziriam na estrutura por meio do torque.

A característica da não-linearidade leva a crer que a hipótese mais provável é a de saturação do núcleo magnético na frequência de operação (60Hz), entretanto, são necessários mais estudos sobre as características magnéticas do núcleo para que essa afirmação possa ser comprovada.

6.3.2 *Scanner* ressonante de 4 kHz

O *scanner* para operação em 4 kHz é mostrado na fig. 6.5(a). Devido à elevada rigidez torsional necessária para que o dispositivo oscilasse nesta frequência, a espessura da lâmina de Bronze-fosforoso foi de 0.7mm, contra os 0.50mm da lâmina utilizada nos dispositivos de 60Hz. Com isso não foi necessária a utilização de barras de torção em forma de serpentina, e os modos de vibração não-torsionais indesejados puderam ser mais facilmente isolados no projeto por elementos finitos. De maneira geral, este *scanner* apresentou um desempenho superior se comparado ao anterior para operação em 60 Hz.

A resposta em frequência do dispositivo é apresentada na fig. 6.7(a), onde pode observar-se a predominância do modo torsional. A ressonância ocorreu em 3677 Hz e a máxima deflexão óptica obtida foi de 21.7° , para uma tensão de atuação mantida constante em 13V pico-a-pico. A diferença de aproximadamente 8% entre o valor de projeto 4 kHz, e o medido, 3677 Hz, pode ser creditada ao aumento no momento de inércia do espelho devido a adição de uma superfície refletiva, necessária pois a superfície do Bronze-fosforoso, por não ser polida, não apresenta boa refletividade⁵.

A questão da máxima refletividade que pode ser obtida neste material por polimento, e a necessidade ou não de adição de um espelho é importante do ponto de vista da fabricação, e do desempenho do dispositivo. De fabricação, porque um processo adicional é necessário, e de desempenho, porque do ponto de vista dinâmico, o espelho não sendo monoliticamente acoplado à estrutura apresenta um movimento que pode comprometer a qualidade do feixe de varredura.

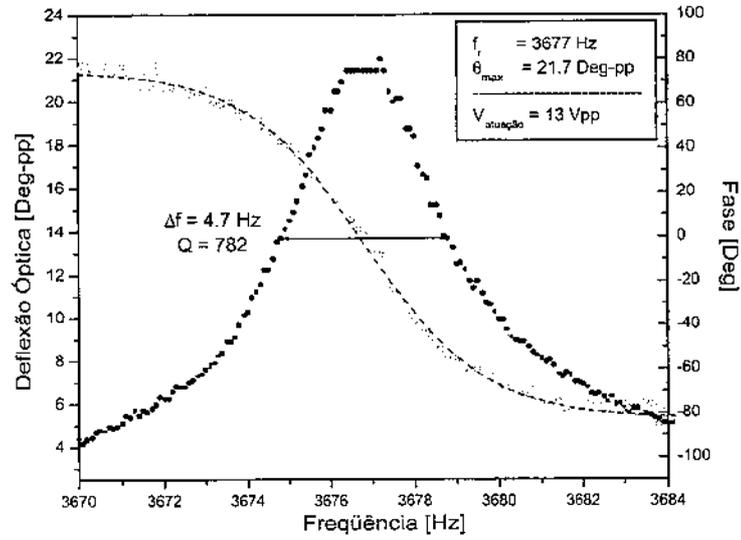
Espelhos metálicos em Alumínio e Berílio são comuns na literatura,^{Marshall 1985} entretanto não foi encontrada nenhuma referência na literatura à utilização do Bronze-fosforoso em espelhos. Mais pesquisas são necessárias nesta área para a verificar a adequação do material do ponto de vista óptico.

A relação entre a tensão de atuação e o ângulo de deflexão é mostrada na fig. 6.7(b). De maneira semelhante ao dispositivo de 60Hz, esta relação não é linear. Neste caso, entretanto, um comportamento sem a característica da saturação foi observado, conforme mostrado na fig. 6.8, onde são comparadas as relações para os dispositivos em 60Hz e em 4000Hz. A princípio, a saturação eletromagnética do núcleo poderia justificar a saturação observada na curva para 60Hz e não observada para o dispositivo em 4kHz. O comportamento da curva de histerese varia significativamente com a frequência,^{Slemon 1966, Smith 1985} de modo que a saturação pode ser alcançada para maiores ou menores valores de H , de acordo com a frequência. Uma vez alcançada a saturação, um aumento na tensão de atuação não mais implicaria em um aumento do torque, o que justificaria a

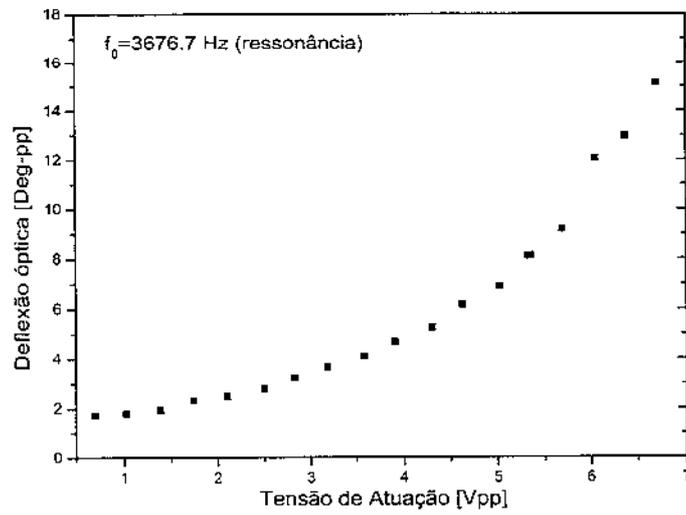
⁵Um pequeno pedaço de Si foi colado no centro do *scanner* para reflexão da luz, uma vez que a superfície do Bronze-fosforoso não era polida.

curva observada. Em 4 kHz esta saturação deve ocorrer para maiores valores da tensão de atuação, o que justifica o perfil observado. Entretanto, mais estudos e experimentos seriam necessários para validar esta suposição.

A curva de relaxação do dispositivo é mostrada na fig. 6.9. O ajuste do perfil de decaimento por uma função do tipo exponencial é mostrado na fig. 6.9(b). Este ajuste mostrou que o perfil de decaimento ajusta-se com erro menor que 0.2% a uma função exponencial. A constante de decaimento, $\gamma = \omega_0/2Q$, obtida a partir do ajuste foi de 12.93, o que resultou num fator de qualidade experimental de 893. O fator de qualidade obtido à partir da curva de resposta em frequência, fig. 6.7(a) foi de 782, o que implica em uma diferença de 12% que pode ter ocorrido devido a diferenças nos procedimentos utilizados para medição. A medida através da curva de relaxação mostra-se mais adequada neste caso por ser realizada em uma única frequência, no caso a ressonância, enquanto que a medida através da resposta em frequência incorpora erros experimentais devido à variação da frequência durante o experimento.



(a)



(b)

Figura 6.7: Caracterização dinâmica do *scanner* ressonante em Bronze-fosforoso. (a) Resposta em frequência, (b) Relação tensão-deflexão óptica.

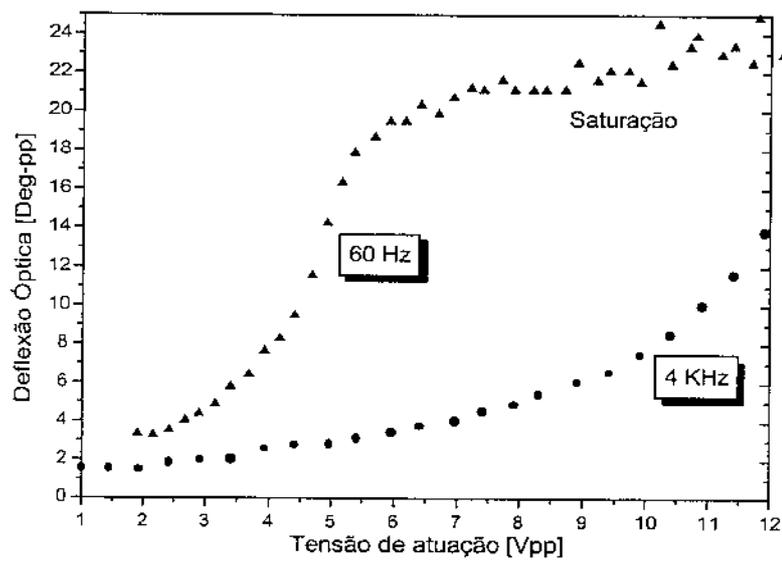


Figura 6.8: Comparação relação tensão de atuação e ângulo de deflexão para *scanners* em 60 Hz e 4 kHz.

Um ensaio de estabilidade do dispositivo foi realizado para estudar a viabilidade do Bronze-fosforoso como material estrutural. O *scanner* foi colocado em funcionamento durante um período de 168 horas, correspondente a 2.5×10^9 ciclos, e foi medida a variação percentual da frequência de varredura, e da amplitude de variação. Os resultados deste ensaio são mostrados nos gráficos da fig. 6.10. O objetivo foi verificar se existe algum princípio de fadiga no dispositivo, o que poderia ser percebido por uma variação monotônica na frequência de varredura ou amplitude de deflexão durante o ensaio.

Os resultados mostraram que, no período de observação, não houve nenhuma variação permanente da frequência e deflexão como resultado do início de um processo de fadiga do material. A distribuição dos valores medidos apresentou distribuição Gaussiana, com uma dispersão de 0.7% na frequência e de 4.7% na amplitude.

Para a análise da fadiga por métodos convencionais seria necessário medir várias amostras durante um período muito maior de tempo, conforme realizado, por exemplo, no trabalho de Miyajima *et al.*,^{Miyajima 2003} o que é impraticável sem um conjunto de instrumentos dedicados a este ensaio.

No mesmo ensaio mediu-se a temperatura. Os gráficos referentes a esta medida encontram-se na fig. 6.11. Por estas medidas pode-se observar uma correlação entre a variação da temperatura e da amplitude de deflexão, ao mesmo tempo que a frequência de varredura aparentemente não é influenciada. As regiões 1 e 2 no gráfico mostram esta possível correlação. Entretanto, uma afirmação conclusiva sobre a influência ou não da temperatura nos parâmetros de desempenho do *scanner* só poderia ser dada após análise estatística de um conjunto maior de dados provenientes de mais dispositivos.

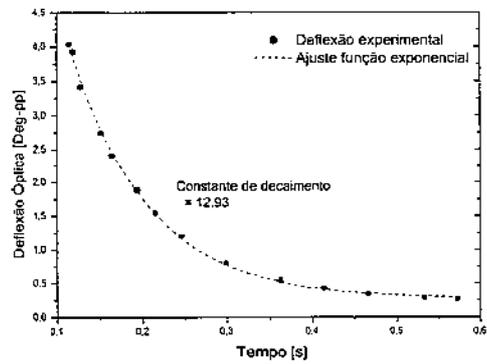
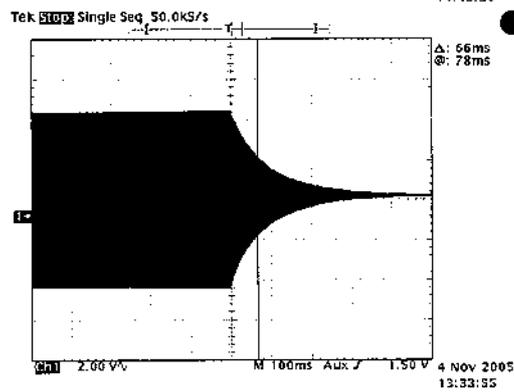
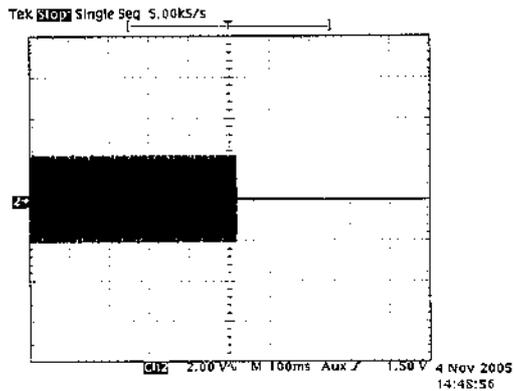
Os parâmetros geométricos do *scanner* juntamente com os resultados dos ensaios encontram-se resumidos na tab. 6.3.

Os resultados apresentados mostraram a viabilidade de utilização do Bronze-fosforoso como material estrutural nos *scanners* ressonantes atuados por indução. Melhorias na geometria dos dispositivos em baixa frequência são necessárias para eliminação ou redução dos modos não torsionais, que limitam o desempenho do dispositivo. A utilização da mola em forma de serpentina rotacionada,^{Barillaro 2005} seria uma solução. Os dispositivos em 4kHz apresentaram desempenho bastante satisfatório, com fator de qualidade da ordem de 800.

Na próxima seção serão apresentados os resultados dos dispositivos fortemente acoplados.

Tabela 6.3: SCANNER FABRICADO EM BRONZE FOSFOROSO 4KHz

DIMENSÕES	
TAMANHO TOTAL [mm^2]	34.5×24.5
ESPELHO	4.5×4.5
ARMADURA	8.5×8.5
COMPRIMENTO BARRA DE TORÇÃO LINEAR CENTRAL [mm]	2.5
COMPRIMENTO BARRAS DE TORÇÃO LINEARES [mm]	3.5
LARGURA BARRAS DE TORÇÃO [mm]	1.0
ESPESSURA DA CHAPA [mm]	0.7
PARÂMETROS FÍSICOS ⁶	
INÉRCIA DO ESPELHO [Kgm^2]	2.105×10^{-10}
INÉRCIA DA ARMADURA [Kgm^2]	7.78×10^{-9}
CONSTANTE DE RIGIDEZ DA BARRA DE TORÇÃO CENTRAL [Nm/rad]	5.36×10^{-4}
CONSTANTE DE RIGIDEZ DAS BARRAS DE TORÇÃO [Nm/rad]	7.51×10^{-4}
PARÂMETROS DE DESEMPENHO	
FREQÜÊNCIA 1º MODO TORSIONAL [Hz]	3676
FATOR DE QUALIDADE 1º MODO TORSIONAL	782



(a)

(b)

Figura 6.9: Curva de relaxação do *scanner* em Bronze-fosforoso 4KHz. (a) Observação experi- mental, acima curva de excitação, e abaixo curva de resposta, e (b) Ajuste do perfil de relaxação por função exponencial.

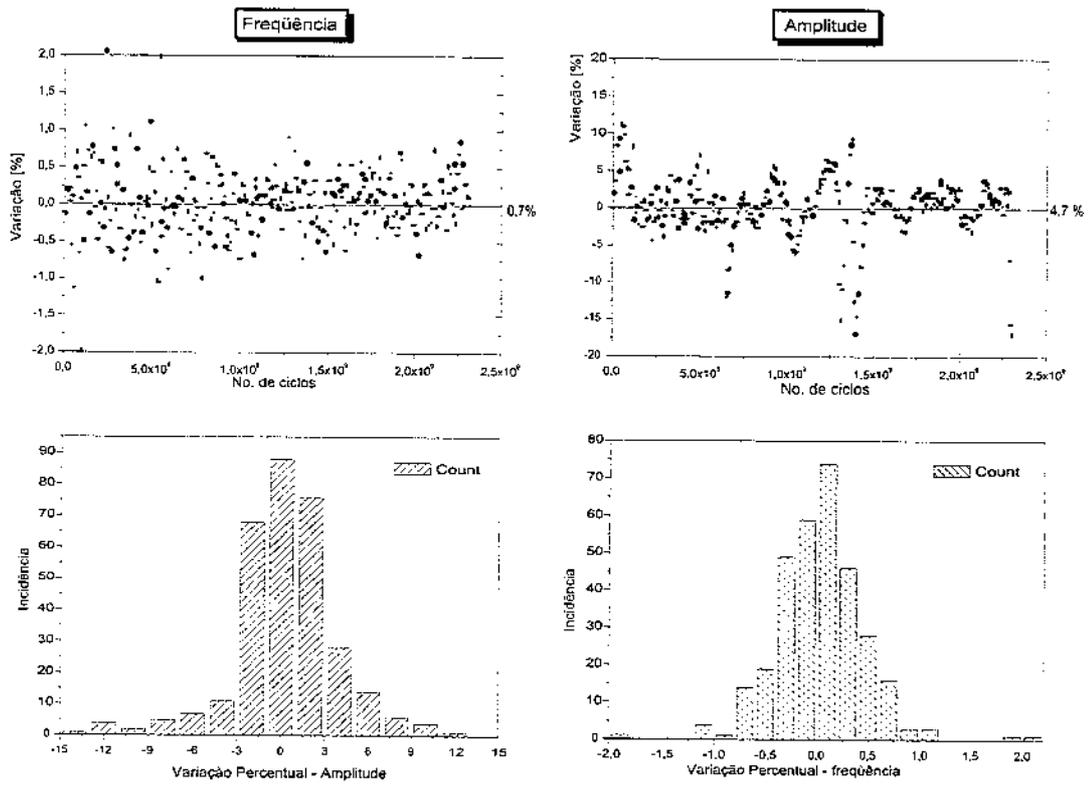


Figura 6.10: Resultados do ensaio de estabilidade do *scanner* em Bronze-fosforoso.

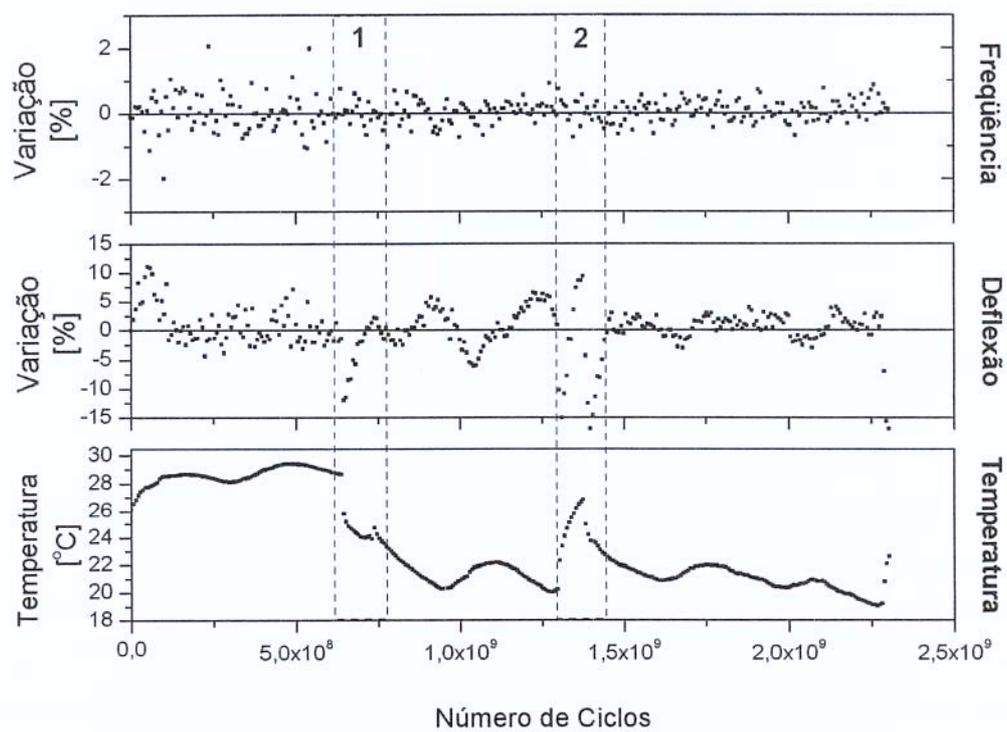


Figura 6.11: Resultados do ensaio de estabilidade do *scanner* em Bronze-fosforoso. Influência da temperatura

6.4 Atuador fortemente acoplado

Como já foi dito anteriormente, o mecanismo de atuação do *scanner* proposto por Ferreira e implementado por Barbaroto era altamente ineficiente. O atuador fracamente acoplado utilizado nos trabalhos anteriores é mostrado na fig. 6.12.

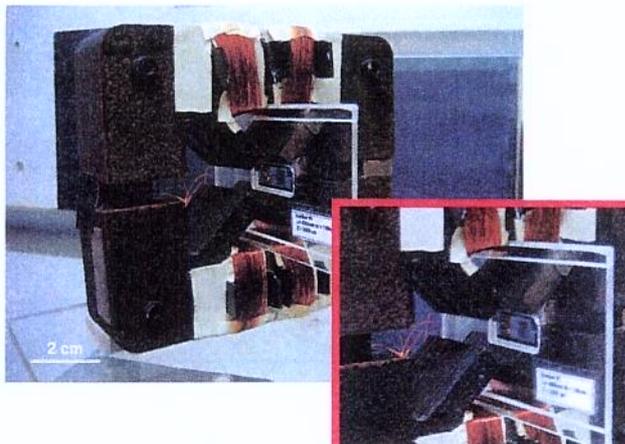


Figura 6.12: Dispositivo fracamente acoplado. No canto inferior direito é mostrado o grande entreferro no mecanismo de atuação.

Tendo sido dimensionado para acionamento de um dispositivo em escala ampliada,^{Barbaroto 2002} este atuador foi adaptado para acionamento dos dispositivos em escala milimétrica. O principal problema desta adaptação foi o tamanho do entreferro da ordem de centímetros, o que ocasiona um aumento da relutância do circuito magnético e conseqüente aumento na potência necessária para geração do fluxo magnético alternado através da armadura. A relação entre o tamanho do entreferro e da armadura é responsável pela redução do acoplamento atuador/armadura, pela maior concentração dos fluxos magnéticos AC e DC estar em uma região externa à região de interesse (armadura). Outra questão relevante é a utilização de um núcleo de aço-silício para operação em freqüências acima de 1 kHz. O aço-silício é um material utilizado em transformadores e motores elétricos para operação na faixa de 60 Hz, de forma que sua permeabilidade é máxima para freqüências abaixo dos 120 Hz. A operação em freqüências maiores reduz a permeabilidade magnética do material e ocasiona um aumento das correntes parasitas,^{Slemon 1966} aumentando as perdas e reduzindo a eficiência do atuador. Por estes fatores, a potência média consumida para acionamento dos *scanners* em Si para operação em torno de 1.3 kHz foi de 40 W, para um ângulo de deflexão de 18° óptico. O que resulta em uma relação de aproximadamente $2.2 \text{ W} \cdot \text{Grau}^{-1}$.

O mecanismo de atuação fortemente acoplado foi proposto para melhorar a eficiência do mecanismo de atuação. Inicialmente, foi construído um protótipo em fenolite em escala ampliada, para

operação em frequências abaixo de 100Hz. O protótipo construído em fenolite é mostrado na fig. 6.13(a).

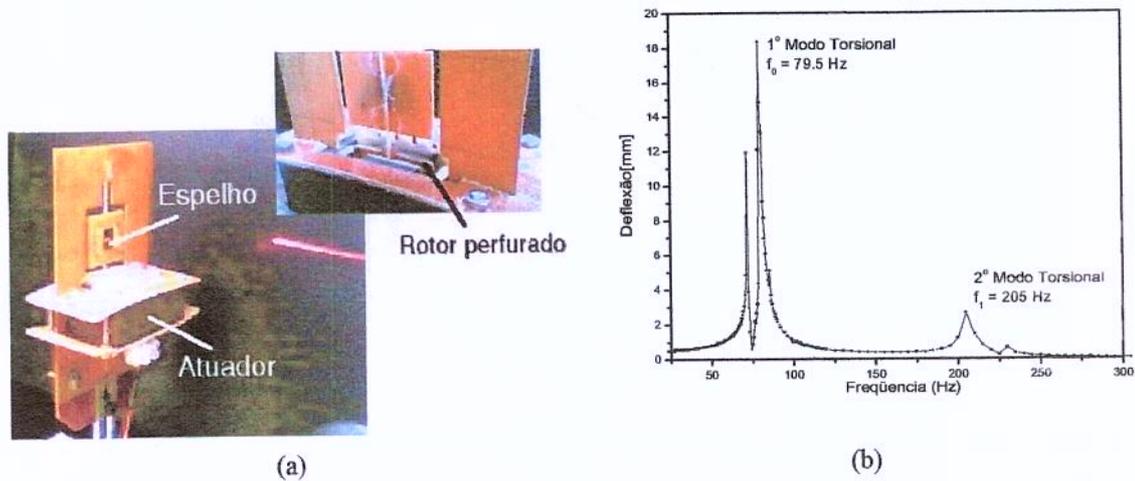


Figura 6.13: Protótipo fabricado em fenolite para estudo de viabilidade do mecanismo de atuação fortemente acoplado. (a) Dispositivo em operação e detalhe do rotor perfurado, (b) Resposta em frequência.

A resposta em frequência para este protótipo é mostrada na fig. 6.13(b), onde pode-se observar o primeiro modo torsional em 79 Hz e o segundo em 208 Hz. Devido à reduzida rigidez das barras de torção nos sentidos longitudinal e transversal à superfície do espelho, outros modos foram observados. A potência média consumida por este atuador foi de 1 W, em 79.5 Hz e de 1.2 W para operação em 208 Hz. A diferença é causada pelo aumento da reatância indutiva com a frequência ($X_L = \omega L$). A deflexão óptica obtida foi de 20 mm, o que implica em um ângulo óptico de 21.6° . A relação potência/deflexão para este dispositivo é de $46 \text{ mW} \cdot \text{Grau}^{-1}$, cerca de 50 vezes menor que para o atuador fracamente acoplado. Este resultado motivou o desenvolvimento de um mecanismo de atuação miniaturizado e dedicado para os dispositivos planares da ordem de milímetros.

O atuador fortemente acoplado miniaturizado desenvolvido é mostrado na fig. 6.14(b).

Para fabricação destes atuadores, optou-se pela utilização de núcleos de ferrite ao invés de aço-silício, devido às melhores propriedades magnéticas deste material para frequências da ordem de kilohertz, e à maior facilidade na montagem do dispositivo, ocasionada pelo fato da ferrite ser comercializada em blocos com diferentes formatos (E, I, EI, U, entre outros), em comparação às lâminas do aço-silício que devem ser “empilhadas” uma a uma para formação do núcleo.

O consumo de potência para os dispositivos miniaturizados em ferrite foi tipicamente de 100 mW, para ângulo de deflexão ópticos típicos de 20° , o que resulta numa relação potência/deflexão de aproximadamente $5 \text{ mW} \cdot \text{Grau}^{-1}$, cerca de 400 vezes maior que a relação para o atuador fraca-

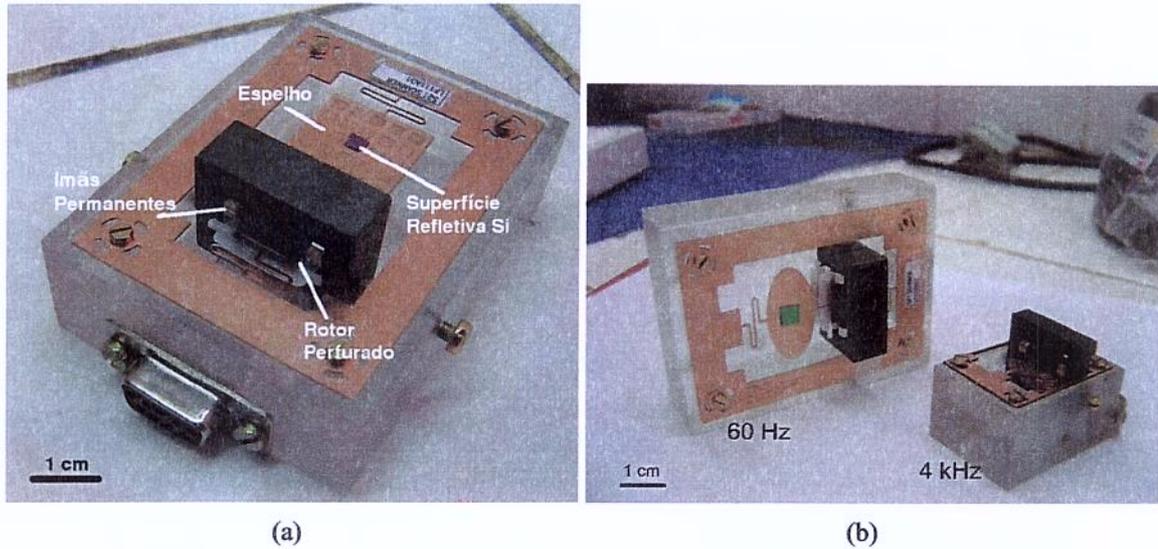


Figura 6.14: Dispositivos fortemente acoplados miniaturizados.(a) *Scanner* 60Hz e (b) *Scanner* 4kHz.

mente acoplado.

A tab. 6.4 a seguir apresenta um resumo comparativo do desempenho dos atuadores fraca e fortemente acoplados.

Tabela 6.4: DESEMPENHO COMPARATIVO ATUADORES FRACA E FORTEMENTE ACOPLADOS

	<i>Fracamente acoplado</i>	<i>Fortemente acoplado 1</i>	<i>Fortemente acoplado 2</i>
Tamanho total [mm^2]	150 × 150	80 × 50	40 × 10
Material	Aço-silício	Aço-silício	Ferrite
Massa [Kg]	0.7	0.3	0.1
Frequência de operação [Hz]	1300	80	60 e 4000
Consumo de potência [W]	40	1	0.1
Relação Potência/Deflexão [$W \cdot Grau^{-1}$]	2.2	0.046	0.005

Na próxima seção serão apresentados os resultados das contribuições para uma metodologia de projeto.

6.5 Metodologia de projeto

Os resultados da metodologia de projeto proposta no capítulo 5 podem ser quantificadas através da comparação entre os parâmetros de projeto e os resultados experimentais obtidos.

6.5.1 Scanner com um rotor^{Oliveira 2006}

A metodologia de projeto para o *scanner* com um rotor foi validada através de sua aplicação ao dispositivo indutivo fabricado por Barbaroto.^{Barbaroto 2002} O ponto de operação do dispositivo, uma vez especificadas as condições de operação pode ser obtido graficamente a partir do gráfico de projeto mostrado na fig. 6.15.^{Oliveira 2006}

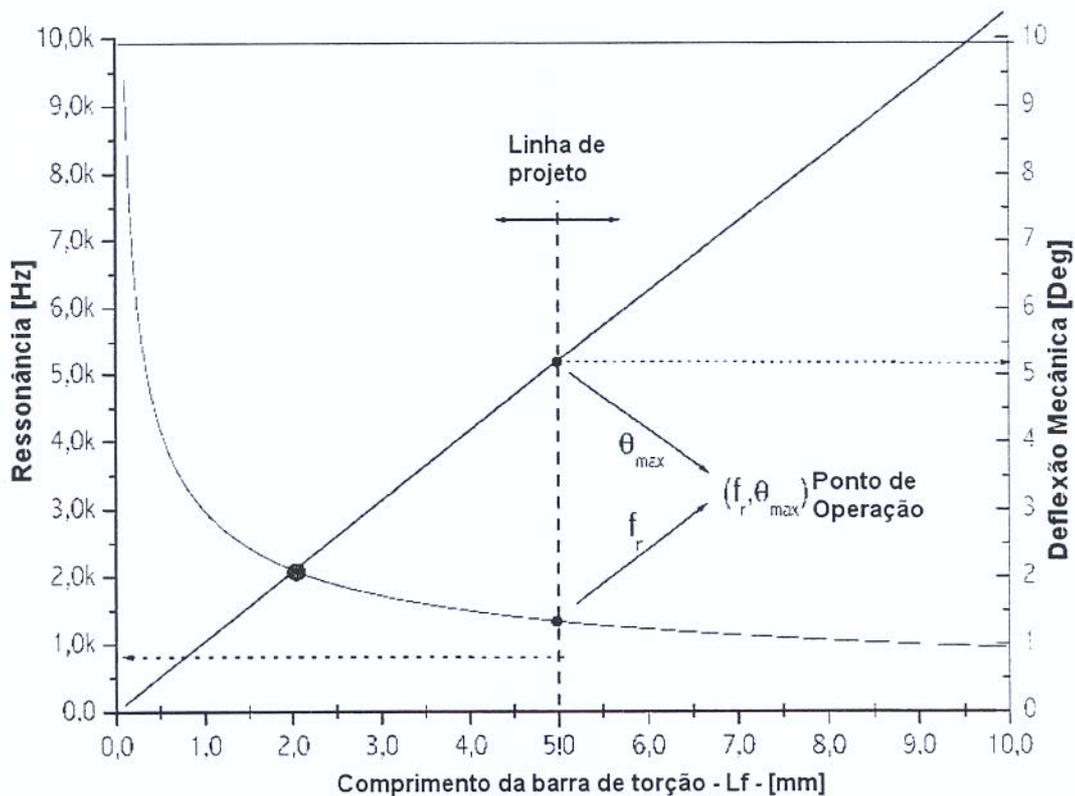


Figura 6.15: Gráfico de projeto para o *scanner* com um rotor.

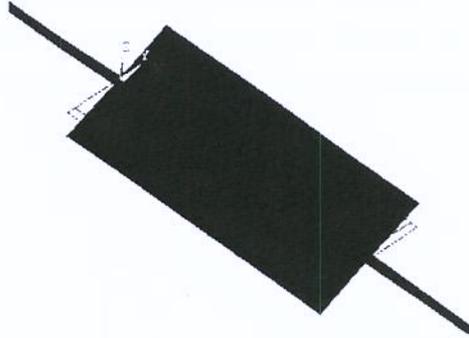
No gráfico de projeto são traçados o ângulo de deflexão mecânica e a frequência de operação em função de uma variável de projeto, no caso o comprimento da barra de torção. Uma linha de projeto, intercepta as duas curvas e fornece um par que representa o ponto de operação do dispositivo para o comprimento correspondente da barra de torção.

A partir dos parâmetros de geometria, o modelo por elementos finitos estrutural forneceu os modos de vibração da estrutura. O 1° modo torsional é mostrado na fig. 6.16(a). Por este modelo a ressonância ocorre em 1373 Hz. A resposta em frequência do dispositivo, mostrou que a ressonância do 1° modo torsional ocorreu em 1311.5 Hz, conforme mostrado na fig. 6.16(b). O ângulo de deflexão mecânico experimental foi de 5°, contra os 5.2° previstos pelo modelo.

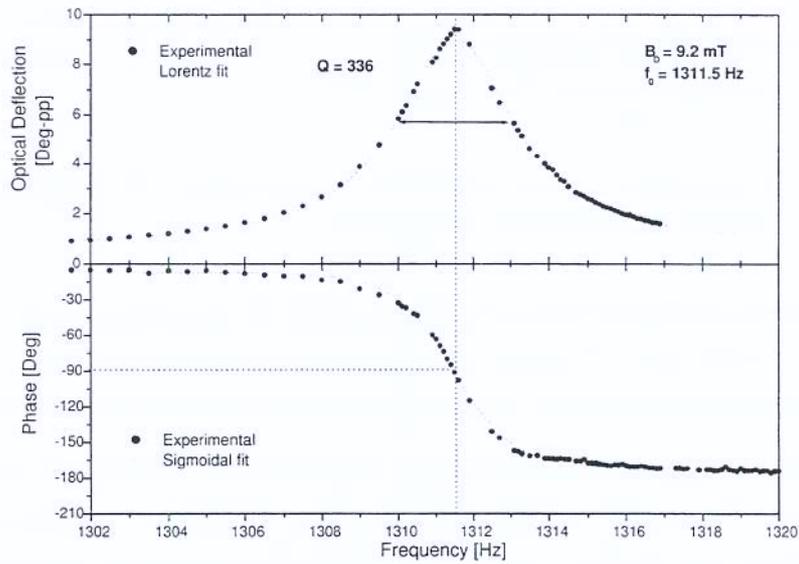
A metodologia de projeto para o *scanner* com um rotor com atuador fracamente acoplado mostrou-se adequada, e representa uma contribuição importante deste trabalho.

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =1
FREQ=1373
DMX =412.035

AN
JAN 28 2004
15:45:09



(a)



(b)

Figura 6.16: Comparação entre os resultados experimentais e de projeto.(a) 1° modo torsional previsto, (b) Resposta em frequência experimental.

6.5.2 Scanner com duplo rotor

Os resultados referentes ao *scanner* projetado para operação em 60Hz são mostrados na fig. 6.17. Segundo a análise modal, o primeiro modo torsional deveria ocorrer em torno de 64.62 Hz, como observado na fig. 6.17(a), que apresenta a forma deste modo. A curva de resposta em frequência obtida experimentalmente a partir dos ensaios descritos anteriormente, sec.6.3, mostrou a ocorrência deste modo em 64.4Hz, o que implica em um desvio menor do que 0.4%. O modo fletor observado experimentalmente em 65.7Hz, foi previsto pelo modelo em 66.2Hz.

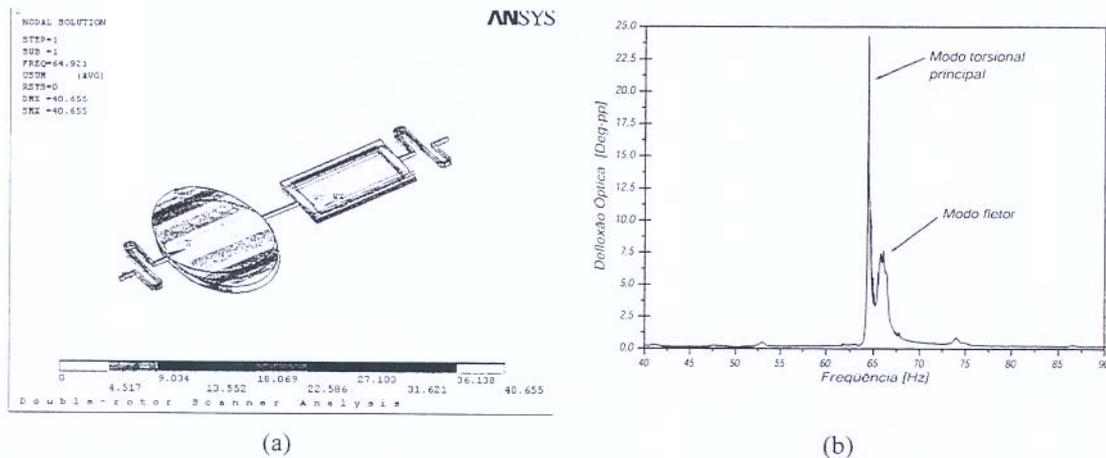


Figura 6.17: Comparação entre os resultados experimentais e de projeto.(a) 1° modo torsional previsto, (b) Resposta em frequência experimental.

As previsões do modelo para o *scanner* em 4kHz são mostradas na fig. 6.18. A frequência de ressonância prevista para o 1° modo torsional deveria ocorrer em 4055 Hz, contra 3679 Hz, obtido a partir da resposta em frequência, o que representa uma diferença menor que 10%.

A previsão do ângulo de deflexão para o dispositivo com duplo rotor com atuador forte apresenta alguns problemas. Ao contrário do dispositivo fracamente acoplado, que apresentou uma diferença entre o valor previsto e medido menor que 5%, no caso do atuador fortemente acoplado esta previsão não pode ser realizada com a precisão necessária. A falta de dados experimentais sobre o núcleo de ferrite empregado, aliado à falta de informações sobre a variação em seu comportamento em diferentes frequências, constituiu um obstáculo a uma correta estimativa do torque indutivo gerado no dispositivo.

Aliado a isso, a dependência do ângulo de deflexão do fator de qualidade do dispositivo, que por sua vez depende de maneira complexa de uma série de fatores, inclusive eletromagnéticos, impossibilitou uma previsão do comportamento ângulo de deflexão do *scanner* com atuação fortemente

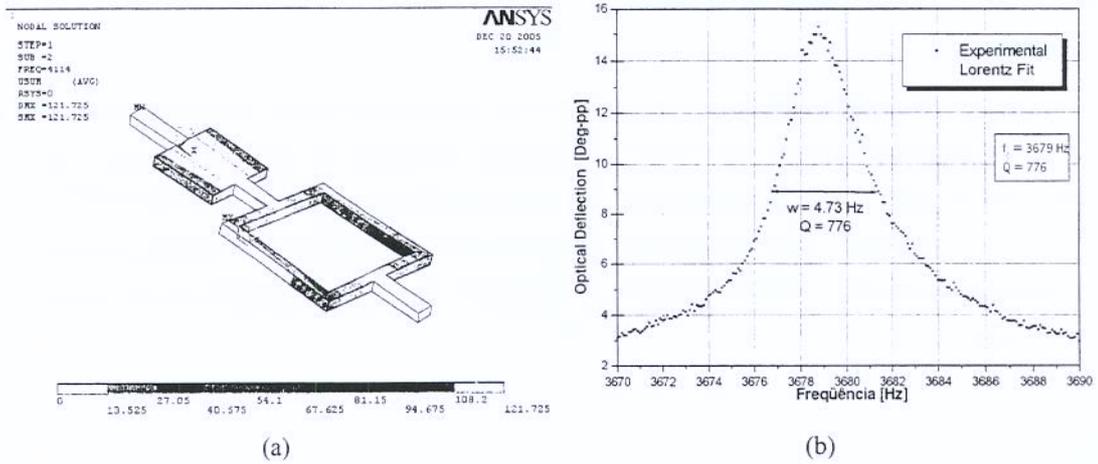


Figura 6.18: Comparação entre os resultados experimentais e de projeto. (a) Análise modal 1^o modo torsional, (b) Resposta em frequência.

acoplada.

Possíveis soluções para estas deficiências no modelo serão apresentadas no próximo capítulo. A seguir serão apresentados os resultados referentes aos modelos por elementos finitos desenvolvidos neste trabalho.

6.6 Modelos por elementos finitos

Nesta seção serão validados os modelos por elementos finitos desenvolvidos no decorrer do trabalho. Inicialmente será apresentado o modelo estrutural do dispositivo com duplo rotor, validado por meio de um experimento de vibrometria laser Doppler,^{Mark H. Richardson 1999} ou LDV (*Laser Doppler Vibrometry*). Em seguida será apresentado o modelo eletromagnético para o dispositivo fracamente acoplado, validado através de medições do campo magnético em posições chave do dispositivo.

6.6.1 Estrutural^{Oliveira 2005}

O modelo estrutural foi desenvolvido conforme descrito no capítulo 5. Os testes estruturais realizados para validação do modelo teórico foram realizados utilizando a técnica da Função Resposta em Frequência, FRF.^{Mark H. Richardson 1999} Esta técnica possibilita o estudo das propriedades dinâmicas de uma estrutura através da relação entrada-saída entre dois pontos da estrutura, em função da frequência. Uma FRF é uma medida de quanto variam o deslocamento, a velocidade ou a aceleração da estrutura, por unidade de força de excitação para um determinado grau de liberdade, GDL, de entrada. Um grau de liberdade pode ser definido como o movimento, a velocidade ou a aceleração em um determinado ponto da estrutura.

Um experimento de FRF é realizado excitando-se artificialmente a estrutura, medindo-se o deslocamento, a velocidade ou aceleração em diferentes pontos, e pós-processando os dados para obtenção dos modos de vibração da estrutura.

Devido as dimensões dos dispositivos aqui apresentados, da ordem de milímetros, e também a fragilidade das estruturas, em particular as de Si, tornou-se mandatória a utilização de uma técnica óptica, como a LDV, para medição dos deslocamentos e velocidades na estrutura, para posterior pós-processamento para extração dos modos de vibração.

A técnica de vibrometria laser Doppler baseia-se na detecção do deslocamento Doppler de uma fonte de luz coerente refletida ou espalhada por uma pequena área no objeto de teste. O objeto reflete ou espalha a radiação proveniente da fonte de radiação e o deslocamento de frequência Doppler é utilizado para medida da componente da velocidade na direção de incidência da radiação.

Neste ensaio a estrutura foi excitada por um sinal do tipo *chirp*, que é sinal senoidal cuja frequência varia em rampa no tempo, aplicada ao atuador do dispositivo. Um esquema da configuração instrumental utilizada no ensaio é mostrado na fig. 6.19.

Os pontos utilizados para medição da velocidade da estrutura são mostrados na fig. 6.20. Estes pontos foram escolhidos por representarem os pontos sujeitos aos maiores deslocamentos ou tensões na estrutura. Os modos experimentais obtidos são mostrados na fig. 6.21.

Na fig. 6.21 são apresentados os resultados da análise modal teórica e experimental. Por esta figura, a forma dos modos experimentais estão de acordo com os previstos pelo modelo por elementos finitos. Os modos torsionais identificados são o 3° e o 5°. Na tab. 6.5 é apresentada uma comparação entre os modos obtidos pela resposta em frequência e pelo modelo por elementos finitos.

Tabela 6.5: COMPARAÇÃO MODOS TORSIONAIS PREVISTOS PELO MODELO FEM E EXPERIMENTAIS

FREQ. RESSONÂNCIA EXPERIMENTAL ^a	FREQ. RESSONÂNCIA FEM	DIFERENÇA
1° modo torsional 1316Hz	1° modo torsional 1414Hz	7.4%
2° modo torsional 2542Hz	2° modo torsional 2523Hz	0.8%

^aObtida a partir da curva de resposta em frequência.

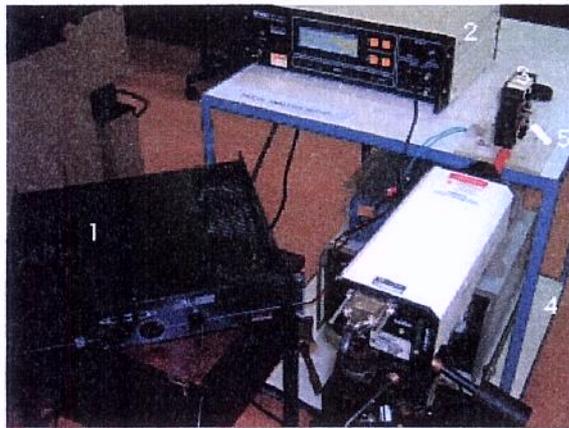
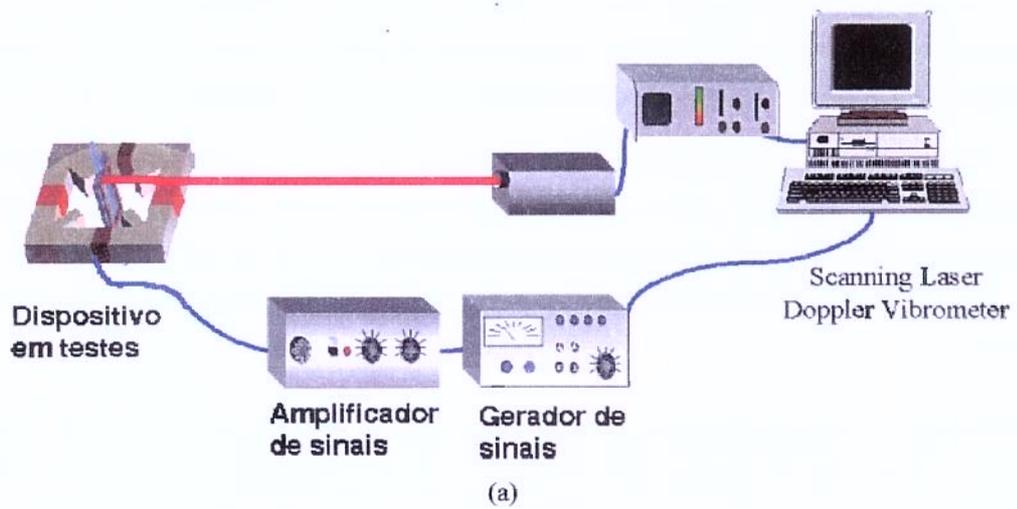


Figura 6.19: Configuração experimental utilizada no experimento de vibrometria laser Doppler. (a) Ilustração do arranjo experimental e (b) Arranjo experimental .

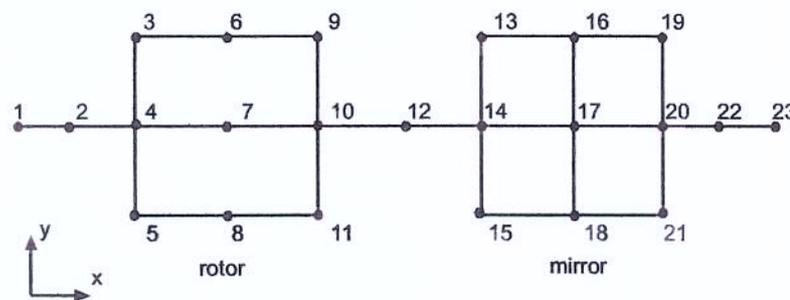


Figura 6.20: Pontos escolhidos na estrutura para medição das velocidades.

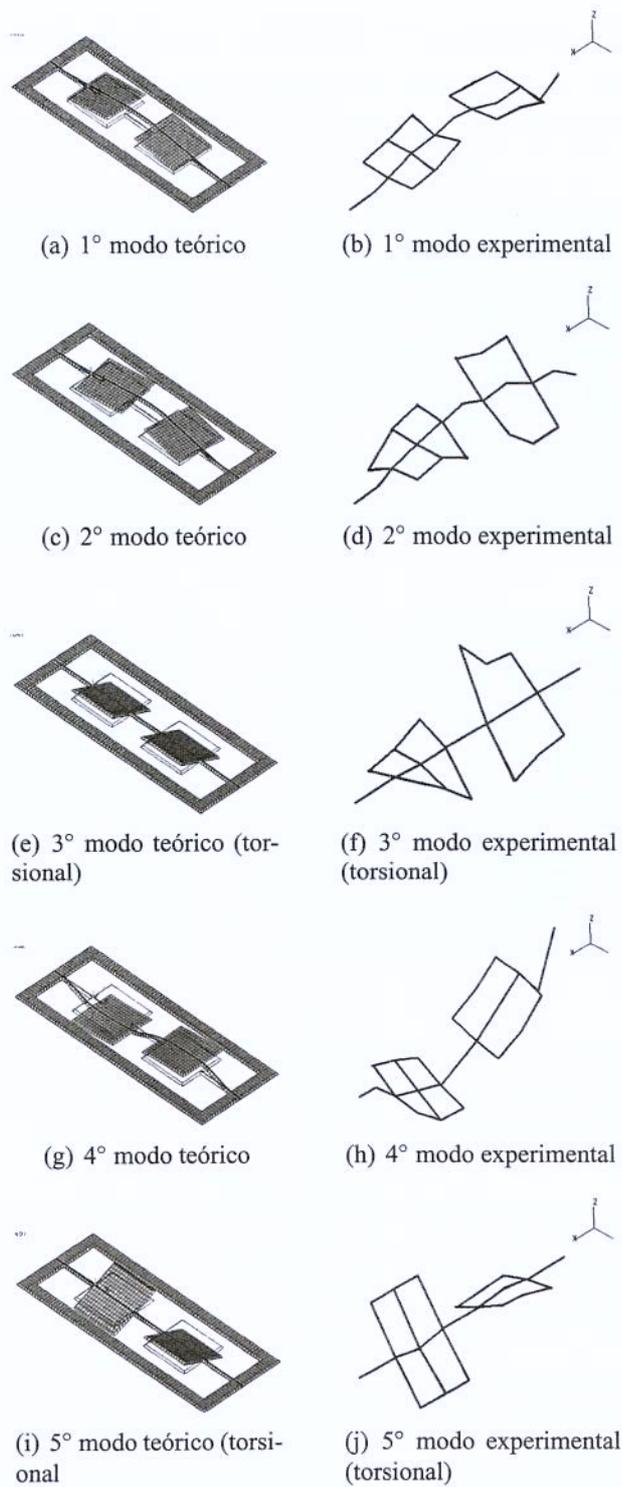


Figura 6.21: Comparação dos modos de vibração teóricos e experimentais obtidos por LDV.

6.6.2 Eletromagnético Oliveira 2005, Oliveira & Ferreira 2005

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações por elementos finitos do atuador fracamente acoplado. A densidade dos campos magnéticos gerados pelas bobinas de atuação e pelos ímãs permanentes são apresentadas na fig. 6.22.

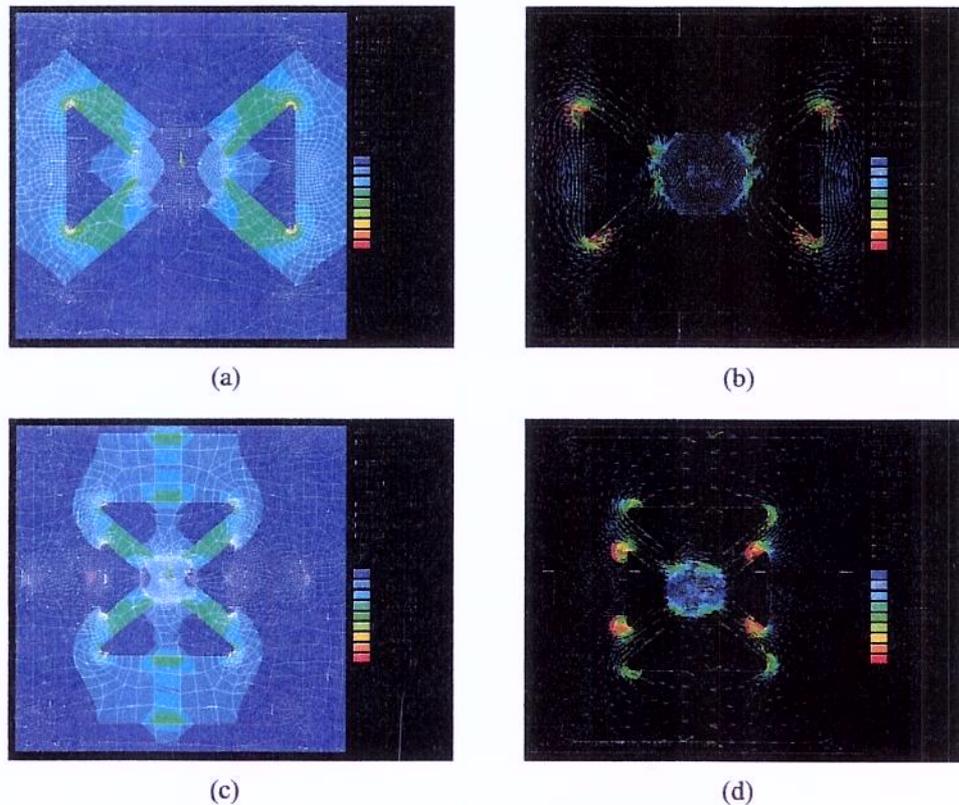


Figura 6.22: Densidade de fluxo magnética prevista pelas simulações por elementos finitos. (a) Densidade de Fluxo AC, (b) Distribuição vetorial do fluxo AC (c) Densidade de fluxo DC, (d) Distribuição vetorial do fluxo DC.

Por estes gráficos, pode-se observar que as maiores densidades tanto dos campos AC como DC encontram-se fora do centro do entreferro, onde deve localizar-se a armadura, o que ocasiona uma forte redução na indutância mútua do dispositivo, e conseqüentemente em seu desempenho.

Estes resultados foram validados através de medidas dos campos magnéticos AC e DC no entreferro do dispositivo, na frequência de 60Hz e 1kHz, realizados com o arranjo experimental mostrado na fig. 6.23. Nesta configuração, um sensor Hall é utilizado para medida do campo magnético. A tensão elétrica na saída do circuito de aquisição do sensor é enviado a um osciloscópio, que faz a aquisição do sinal e o envia a um software desenvolvido especialmente para esta medida.

A comparação entre os resultados experimentais e previstos pelo modelo é mostrada nos gráfi-

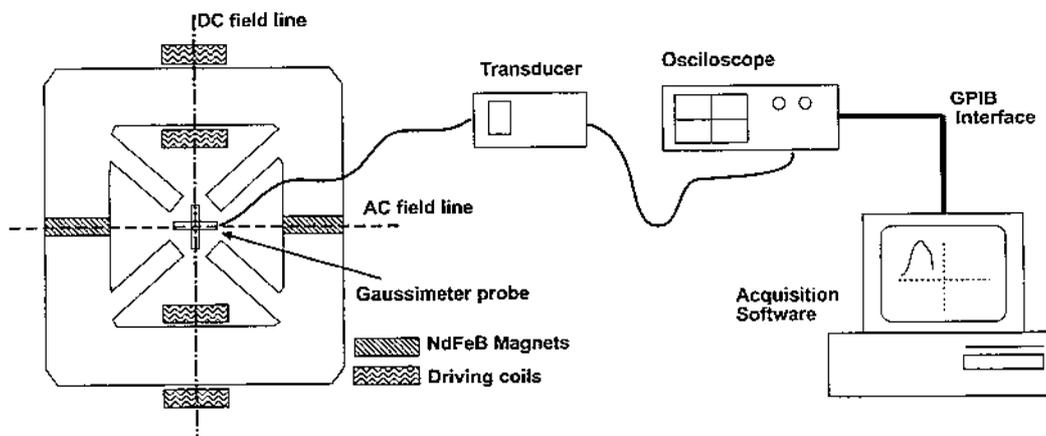


Figura 6.23: Arranjo experimental para obtenção dos campos magnéticos AC e DC na região da armadura.

cos da fig. 6.24.

A previsão do modelo para a densidade de fluxo magnético em 80Hz, fig. 6.24(a), mostrou-se adequado para os diferentes valores da tensão de acionamento aplicadas, com um erro menor que 5% na região de interesse, e máximo de $\approx 30\%$ nas demais regiões. Acredita-se que este erro possa ser reduzindo refinando-se a malha e melhorando-se o procedimento para mapeamento do campo magnético no entreferro do dispositivo.

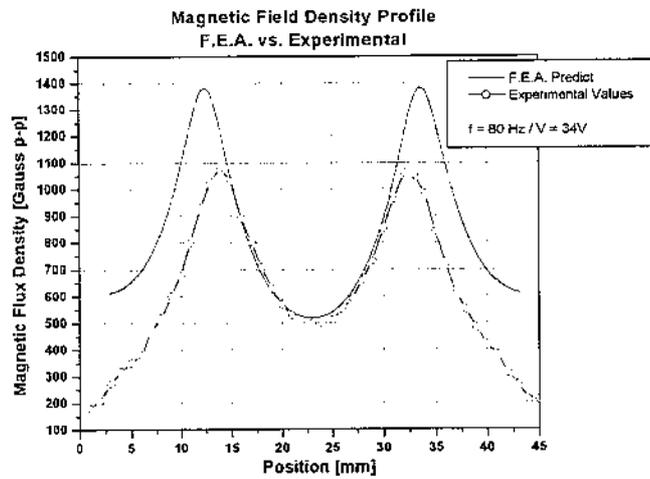
Entretanto, o modelo não pode prever adequadamente a densidade do fluxo magnético para o dispositivo operando em 1kHz. O valor experimental ao centro do dispositivo foi de 270 Gauss, contra apenas 7 Gauss previstos pelo modelo, para uma tensão de atuação de 34V, vide fig. 6.24(a) e fig. 6.24(c) e tamanha disparidade pode ser creditada as propriedades do material utilizadas no modelo. Sendo o aço-silício utilizado majoritariamente em transformadores e motores elétricos para operação a no máximo 120Hz, não foram encontrados dados sobre as propriedades deste material em frequências em torno de 1kHz. Além disso, devem ser adicionados ao modelo os efeitos das correntes parasitas^{Slemmon 1966} que se tornam maiores com a frequência.

Com o objetivo de verificar o comportamento da tensão induzida na armadura em função da frequência e da tensão de atuação, a armadura foi adicionada ao modelo e novas simulações foram realizadas.

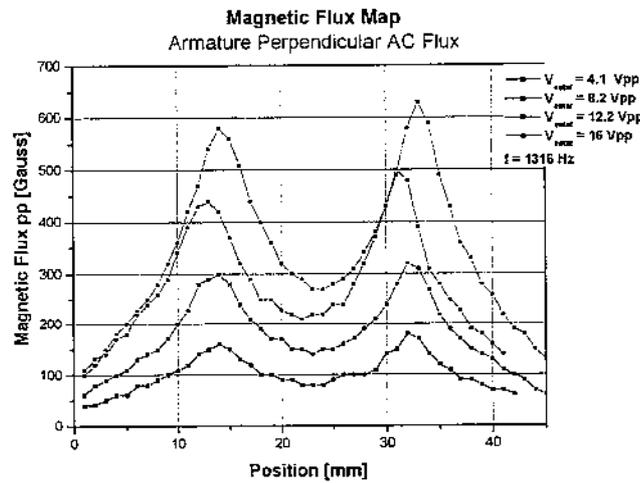
Para verificar a relação entre a tensão induzida na armadura e a tensão de acionamento, fez-se uma varredura da tensão de acionamento e obteve-se a tensão de armadura, para o dispositivo operando em 80Hz e 1kHz. Conforme o modelo esta relação é linear, fig. 6.25(a), o que foi verificado experimentalmente e é mostrado na fig. 6.25(b).

O comportamento da tensão induzida com a frequência é mostrado na fig. 6.26. Conforme o modelo apresentado no capítulo 5, a tensão induzida é proporcional à frequência de operação, o que pode ser observado até a frequência de aproximadamente 150Hz. Após esta frequência, a corrente no primário reduz-se devido ao aumento da reatância indutiva do enrolamento, e com isso reduz-se também a tensão induzida na armadura. Um projeto adequado do estator deve prever o pico a tensão induzida na armadura coincidente com a frequência de operação de ressonância do *scanner*.

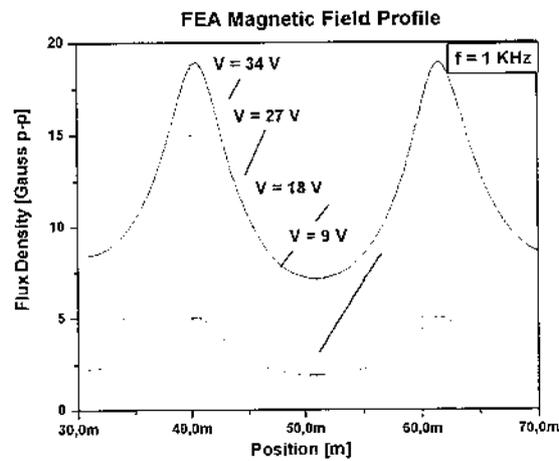
Na próxima seção serão apresentados alguns resultados não previstos pelos modelos e observados experimentalmente.



(a)

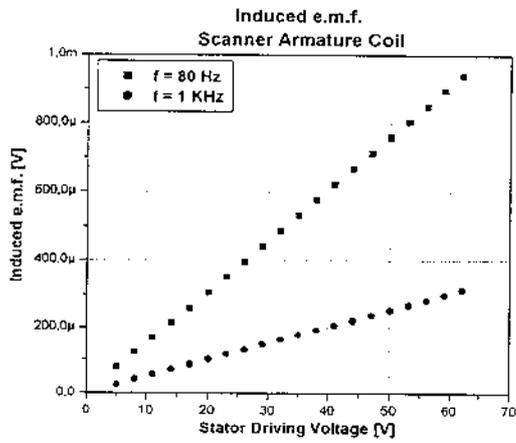


(b)

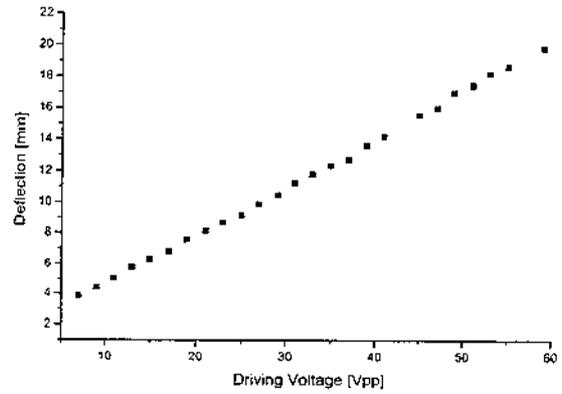


(c)

Figura 6.24: Comparação entre o fluxo magnético experimental e previsto pelo modelo por elementos finitos.(a) 80 Hz, (b) 1 kHz experimental e (c) 1 kHz elementos finitos.



(a)



(b)

Figura 6.25: Relação entre a tensão induzida na armadura e a tensão de acionamento do dispositivo. (a) Previsão do modelo, (b) Medida experimentalmente.

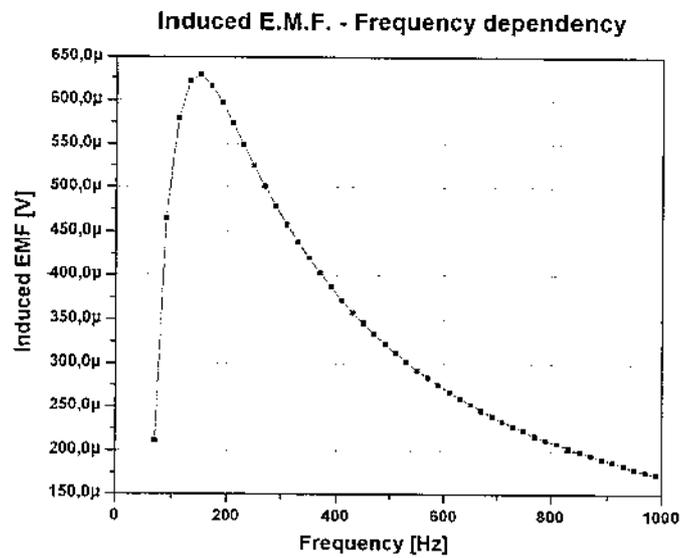


Figura 6.26: Variação prevista pelo modelo FEM da tensão induzida na armadura com a frequência.

6.7 Sumário

Neste capítulo foram apresentados os resultados experimentais mais relevantes obtidos a partir das contribuições propostas nesta tese. O desempenho dos dispositivos com dois rotores em Silício e em Bronze-fosforoso foi apresentado. O impacto da implementação do atuador fortemente acoplado no desempenho dos *scanners* indutivos foi apresentado. A metodologia de projeto e os modelos por elementos finitos foram validados através da comparação com dados experimentais. Finalmente foram apresentados alguns resultados não previstos pelos modelos mas observados experimentalmente.

No próximo capítulo serão discutidas as possíveis causas e as implicações dos resultados mostrados neste capítulo.

Capítulo 7

Discussão dos resultados

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos a partir das contribuições propostas e implementadas e que foram apresentados no capítulo anterior.

As implicações destes resultados para a tecnologia de *scanners* ressonantes serão discutidos e novos flancos de pesquisa abertos a partir deste trabalho serão propostos ao final do capítulo.

7.1 Breve revisão histórica

De forma a facilitar a discussão, serão lembrados os problemas e as questões em aberto na tecnologia de *scanners* ressonantes indutivos que serviram de motivação para este trabalho.

O *scanner* indutivo ressonante proposto por Montagu^{Montagu 1985} em 1985 mostrou-se interessante por eliminar a necessidade de conexão elétrica entre as partes fixa e móvel do dispositivo. Entretanto, uma deficiência desta tecnologia era a complexidade mecânica requerida para a montagem e o posterior ajuste do dispositivo. Tal complexidade exigia que o processo de fabricação fosse serial, aumentando o custo do dispositivo final.

Visando adequar a tecnologia de fabricação em lotes proporcionada pelas técnicas de microeletrônica ao mecanismo de atuação por indução, Ferreira propôs em 1998^{Ferreira 1998} um dispositivo planar atuado por indução. A grande vantagem destes dispositivos seria a possibilidade de fabricação em lotes por meio dos processos de fabricação utilizados em microssistemas. Esta proposta representou um avanço para a tecnologia de *scanners* ressonantes tendo sido patenteada nos E.U.A. no ano de 2000.^{Ferreira 2000}

Embora houvesse um protótipo do dispositivo indutivo planar, não havia ainda um processo que possibilitasse sua fabricação em lotes. Por isso, em 1999, Barbaroto iniciou as pesquisas para desenvolvimento de um processo confiável para fabricação do dispositivo em lotes, o processo Si-LIG.^{Barbaroto 2003} Esta pesquisa resultou no trabalho de mestrado que precedeu este estudo.^{Barbaroto 2002}

Este foi o panorama encontrado no início desta pesquisa, em 2002. O *scanner* ressonante atuado por indução e planar havia sido demonstrado e fabricado em Silício por meio de processo de fabricação baseado na tecnologia de microssistemas. Entretanto, pouco ou quase nada havia sido estudado sobre as complexas relações existentes entre os diferentes princípios físicos envolvidos no funcionamento do dispositivo. Também não havia nenhuma metodologia para a caracterização dos dispositivos para obtenção de suas características dinâmicas. A falta de uma sistemática de projeto e a ausência de modelos físicos para o mecanismo de atuação resultaram na fabricação de dispositivos funcionais, mas com rendimento baixíssimo. Para efeito de comparação, o dispositivo fabricado por Barbaroto consumia cerca de $2.2 W$ por grau óptico, enquanto dispositivos similares existentes a época consumiam cerca de $0.1 W$ por grau óptico.^{Ferreira & Moehlecke 1999}

Foi neste contexto que iniciou-se este trabalho. Os desafios que motivaram esta pesquisa são enumerados a seguir:

1. Redução do consumo de potência a níveis compatíveis com os dispositivos atualmente existentes;
2. Implementação de um modelo para o mecanismo de atuação;
3. Estudo dos mecanismos físicos e sua interação no funcionamento do dispositivo;
4. Implementação de modelos eletromecânicos que incorporassem os diferentes domínios físicos relacionados ao funcionamento do *scanner* ;
5. Implementação de uma metodologia de projeto;
6. Implementação de melhorias no projeto que aumentassem o torque indutivo e possibilitassem o funcionamento do dispositivos em frequências mais elevadas;
7. Implementação de uma metodologia de testes para os *scanners* .

Adicionalmente, a preocupação com a viabilidade de fabricação em território nacional também norteou este trabalho. O desafio era a utilização de materiais e processos de fabricação que

pudessem ser obtidos e realizados facilmente no país, sem a necessidade de utilização do Si e de *foundries* no exterior para fabricação dos dispositivos.

Estes foram os desafios que motivaram esta pesquisa e que resultaram no conjunto de contribuições em diferentes áreas propostas e apresentadas no decorrer deste trabalho. Para facilidade de discussão, estas contribuições foram divididas em áreas similares que serão discutidas nas seções subseqüentes.

- Contribuições ao desempenho;
- Contribuições para viabilização da fabricação;
- Contribuições ao modelo;
- Contribuições ao projeto;
- Contribuições aos métodos de caracterização.

7.2 Contribuições ao desempenho

São relacionadas aqui as contribuições que possibilitaram melhorar o desempenho do dispositivo em relação a parâmetros como a frequência de ressonância, ângulo de deflexão e, sobretudo, rendimento do dispositivo. Estas contribuições foram:

- Atuador fortemente acoplado;
- *Scanner* com dois rotores.

A implementação do mecanismo de atuação fortemente acoplado nos dispositivos planares possibilitou uma redução de 2.2 W para 5 mW por grau óptico de deflexão. Como já discutido, esta redução deve-se ao aumento na densidade de fluxo magnético na região da armadura devido ao seu confinamento pelo núcleo magnético. Este mecanismo de atuação possibilitou um aumento no torque de cerca de 3 ordens de grandeza. O torque gerado pelo atuador fracamente acoplado é tipicamente da ordem de 10^{-7} N.m,^{Oliveira 2006} contra um torque da ordem de 10^{-4} N.m, estimado para o atuador fortemente acoplado.

O aumento significativo no torque possibilita o projeto de *scanners* com maiores frequências de operação. Os dispositivos fabricados em Bronze-fosforoso foram projetados para operação em

4kHz, contra os 1.5 kHz dos dispositivos fabricados anteriormente. *Scanners* operando em frequências tão elevadas como 8 ou 16 kHz são importantes em aplicações para projeção de imagens,^{Ko 2006} em que a frequência de operação determina a resolução, tab. 7.1.

Tabela 7.1: ESPECIFICAÇÕES DE FREQUÊNCIA PARA DIFERENTES FORMATOS DE VÍDEO^{UREY 2002}

FORMATO DE VÍDEO	QVGA	VGA	SVGA	XGA	SXGA	UXGA	HDTV
RESOLUÇÃO HORIZONTAL - N_h	320	640	800	1024	1280	1600	1920
RESOLUÇÃO VERTICAL - N_v	240	480	600	768	1024	1200	1080
FREQUÊNCIA VARREDURA HORIZONTAL (Hz)	8000	16000	20000	25600	34133	40000	36000

O projeto ótimo do atuador, em que a máxima tensão induzida na armadura coincidissem com a frequência de operação do circuito, fig. 6.26, e a utilização de materiais de elevado desempenho (que podem exibir permeabilidade relativa até 5 vezes maior que a de materiais convencionais), permitiria melhorar ainda mais o desempenho do atuador fortemente acoplado.

O fenômeno da histerese magnética, que se reflete no desempenho do dispositivo na relação entre a tensão de atuação e o ângulo de deflexão, conforme mostrado na fig. 6.6(c), é um ponto negativo do atuador fortemente acoplado. Entretanto, o projeto adequado do dispositivo, onde a máxima permeabilidade do material ferromagnético coincida com a frequência de operação do *scanner*, minimiza este problema, conforme ocorrido para o *scanner* de 4 kHz, fig. 6.8.

A miniaturização do atuador, uma questão importante quando o assunto são os microssistemas, é limitada pelos efeitos da histerese magnética. A redução nas dimensões do núcleo aumenta a concentração do fluxo magnético, B , de forma que o material atinge a saturação para menores valores de H , ou seja para menores valores de corrente. Assim, a corrente induzida na armadura, e conseqüentemente o torque diminuem com as dimensões do dispositivo. Atuadores magnéticos, como os apresentados neste trabalho, são indicados para dispositivos maiores que alguns milímetros. Conforme o dispositivo é reduzido, torna-se mais indicada a utilização de atuadores eletrostáticos.^{Guckel 1998}

O projeto do atuador fortemente acoplado exige o conhecimento das características magnéticas do material do núcleo nas condições a que ele será submetido. Embora estas características estejam disponíveis em catálogo para alguns tipos de materiais, o levantamento experimental das curvas de histerese do material em diferentes frequências é desejável para um projeto adequado dos dispositivos indutivos.

O atuador fracamente acoplado, embora apresente um pior desempenho, apresenta algumas vantagens como uma relação tensão/deflexão linear, importante para o controle do dispositivo, e um processo de montagem relativamente mais simples. A redução de suas dimensões e um desenho

adequado de sua geometria, com a adição de peças polares na região da armadura de forma a concentrar mais o fluxo na região da armadura podem tornar esta tecnologia mais adequada para atuação em dispositivos de baixas frequências.

Os núcleos moldados em ferrite são indicados para operação em frequências elevadas, da ordem de kilohertz, devido à elevada resistência do material que reduz as perdas ocasionadas pelas correntes parasitas. O aço-silício, comercializado em chapas que devem ser cortadas na forma do núcleo, apresenta permeabilidade relativa bem mais elevadas que as ferrites, mas devido à sua condutividade elevada são indicados para operação em frequências mais baixas. Desta forma, a utilização do aço-silício nos dispositivos para operação em baixas frequências é mais indicada. A tab. 7.2 apresenta uma comparação das propriedades de alguns materiais magnéticos mais comuns.

Tabela 7.2: MÁXIMAS PERMEABILIDADES PARA ALGUNS MATERIAIS MAGNÉTICOS

MATERIAL	$\mu/(Hm^{-1})$	μ_r	APLICAÇÃO
FERRITE U 60	.00E - 05	8	UHF CHOKES
FERRITE M33	9.42E - 04	750	CIRCUITOS RESSONANTES
NÍQUEL (99% PUREZA)	7.54E-04	600	-
FERRITE N41	3.77E - 03	3000	CIRCUITOS DE POTÊNCIA
FERRO (99.8% PUREZA)	6.28E - 03	5000	-
FERRITE T38	1.26E - 02	10000	TRANSFORMADORES DE BANDA-LARGA
AÇO-SILÍCIO GO	5.03E - 02	40000	DÍNAMOS, TRANSFORMADORES, MOTORES
SUPERMALLOY	1.26	1000000	CABEÇAS DE GRAVAÇÃO

A implementação do dispositivo com dois rotores apresenta vantagens em relação à geometria com um rotor por possibilitar o desacoplamento entre as funções de atuação e reflexão da luz, que possuem requerimentos bem distintos, como já comentado anteriormente. Entretanto, novos modos de vibração são adicionados à estrutura pela adição de mais um rotor e uma barra de torção, o que torna o seu projeto mais complexo.

Em linhas gerais, pode-se afirmar que a geometria com dois rotores é mais indicada em situações onde necessita-se maior torque e conseqüentemente maiores correntes circulando pela armadura, como nos dispositivos para operação em altas frequências. Nestes casos, poderiam ocorrer distorções no espelho devido ao aquecimento ocasionado pela dissipação de potência na armadura. Já os dispositivos para operação em baixas frequências requerem um torque menor, o que minimiza este problema e torna mais indicado a geometria com um rotor.

O *scanner* indutivo proposto e melhorado neste trabalho possui desempenho compatível com dispositivos similares disponíveis comercialmente, como pode ser observado na tab. 7.3.

Tabela 7.3: COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DO *scanner* FABRICADO E *scanners* COMERCIAIS SIMILARES.

	NUTFIELD	EOPC	General Scanning	Indutivo
DEFLEXÃO [<i>Grau – opt</i>]	±4	±11	±7.5	±18
FREQÜÊNCIA [<i>Hz</i>]	2000	1500	4000	3800
ESPELHO [<i>MM</i>]	20 – 50	6	4 – 10	3 – 6

7.3 Contribuições para viabilização da fabricação

Os dois principais desafios deste trabalho foram: a melhora no desempenho e a pesquisa por materiais e processos de fabricação que tornassem viável a sua fabricação no país. Nesta linha, as seguintes contribuições podem ser destacadas:

- Utilização do Bronze-fosforoso como material estrutural;
- Utilização da foto-gravação química como processo para fabricação em lotes;
- Estrutura monolítica que incorpora o espelho e a armadura.

O processo Si-LIG apresenta algumas desvantagens se imaginássemos sua transposição do mundo acadêmico para a realidade da indústria nacional. Primeiramente, embora o Si apresente propriedades mecânicas excelentes para este tipo de aplicação, ele não está disponível em território nacional tendo que ser importado. Uma vez importado, outro problema é a inexistência no Brasil de empresas ou equipamentos capazes de processá-lo através dos processos de fabricação derivados da microeletrônica. A implementação de uma *foundry* dedicada a fabricação de *scanners* seria inviável do ponto de vista comercial devido aos custos envolvidos e ao volume que teria que ser comercializado para cobertura dos custos iniciais de instalações e maquinário.

A solução encontrada para viabilizar a fabricação no país dos *scanners* indutivos foi a utilização de materiais menos nobres que o Si, mas que pudessem ser adquiridos e principalmente processados em território nacional. O material escolhido foi o Bronze-fosforoso, por suas excelentes propriedades mecânicas, resistência à fadiga e condutividade, além de não possuir ferro em sua composição, e possibilitar a usinagem em lotes por processo de foto-gravação química, comum na indústria gráfica, e que poderia ser prontamente utilizado.

Uma desvantagem do Bronze-fosforoso com relação ao Si diz respeito à sua refletividade. Não foi abordada neste trabalho a questão da máxima refletividade possível que poderia ser obtida pelo

Bronze através de polimento físico ou químico, e se esta refletividade seria suficiente para os *scanners*. Certamente, esta refletividade seria menor que a do Si, que pode alcançar níveis próximos a 88% para comprimentos de onda de 650nm, ^{Miyajima 2004} e cuja refletividade está relacionada à sua estrutura cristalina.

A alternativa que foi utilizada neste trabalho foi a adição, através de adesão, de um espelho ao rotor. A adesão de um espelho à estrutura representa um processo a mais de fabricação e prejudica o desempenho do dispositivo, uma vez que o espelho representa um sistema massa-mola preso ao rotor. Todavia, a utilização do Bronze-fosforoso como espelho após processo de polimento, de maneira similar ao Alumínio e Berílio, comumente encontrados, não pode ser descartada. Mais estudos são necessários para determinar se o Bronze-fosforoso pode ser utilizado como espelho, e como o polimento seria integrado ao processo de fabricação do *scanner*. A interferência da adesão do espelho colado ao dispositivo e do processo de adesão também merecem um estudo específico.

Os *scanners* também podem ser utilizados em aplicações que utilizem comprimentos de onda não visíveis, como a gravação de superfícies, ^{Marshall 1985} que é realizada utilizando-se radiação proveniente de laser de CO₂, dentre outros. Neste caso devem ser realizados estudos específicos para determinação dos materiais que podem ser utilizados como espelhos para o comprimento de onda em questão.

A boa condutividade elétrica do Bronze-fosforoso proporciona uma vantagem não observada em nenhum outro dispositivo similar, a possibilidade de, em uma única estrutura, integrar-se o espelho e a armadura. Esta integração reduziria as etapas do processo de fabricação relacionadas à incorporação da bobina à estrutura, de maneira que, após sua corrosão química, o dispositivo estaria pronto para ser integrado ao atuador. Esta é uma contribuição significativa para tornar o dispositivo mais competitivo do ponto de vista do custo de fabricação.

7.4 Contribuições ao modelo

Para que os mecanismos físicos envolvidos no funcionamento do *scanner* indutivo fossem entendidos e o seu comportamento pudesse ser previsto, foram necessárias contribuições ao modelo do dispositivo. Estas contribuições estão listadas a seguir:

- Modelo elétrico dos atuadores forte e fracamente acoplados;
- Modelo mecânico estrutural do dispositivo com duplo rotor;
- Modelo eletromecânico do dispositivo com dois rotores;

- Modelos por elementos finitos estrutural e eletromagnético.

A modelagem elétrica do atuador fortemente acoplado, apresentada no capítulo 5, é complexa se forem levados em conta a componente resistiva e indutiva da tensão no primário. Conforme já discutido, duas aproximações são possíveis: considerar-se apenas a componente reativa devido à reatância do enrolamento primário, o que faria com que o atuador pudesse ser considerado um transformador ideal, ou considerar-se somente a componente resistiva.

Para que o desempenho do *scanner* seja o melhor possível, é desejável que o dispositivo comporte-se como um transformador ideal, o que pode ser obtido, na prática, através de um número adequado de espiras no enrolamento do primário, de maneira a aumentar sua indutância. Entretanto, a tensão induzida na armadura, que produz o torque, é inversamente proporcional ao número de espiras no primário, eq.5.60, assim, o projeto deve prever um número de espiras que conserve a aproximação de um transformador ideal, sem prejudicar o torque gerado.

Um número insuficiente de espiras no primário geraria harmônicos na tensão induzida na armadura, de forma que a potência aplicada no primário não estaria concentrada em apenas uma componente fundamental, mais em uma série de harmônicos, prejudicando o desempenho do dispositivo.

O modelo elétrico do atuador fortemente acoplado pode ser melhorado com a incorporação ao modelo da curva de histerese do núcleo ferromagnético, o que possibilitaria a previsão da curva I-V do primário do atuador magnético. Isto pode ser realizado, por exemplo, através da linearização da curva de histerese.^{Slemon 1966}

Os modelos eletromecânicos desenvolvidos possibilitaram a interação entre os domínios elétrico e mecânico envolvidos na estrutura. Uma próxima etapa seria adicionar ao modelo as componentes para representação da interação fluido-estrutural. O desenvolvimento de modelos eletromecânicos abre a possibilidade para criação de macromodelos, onde os *scanners* são representados a partir de seus parâmetros concentrados, e seu funcionamento pode ser previsto por programas como o PSPICE, por exemplo.^{Hao 2003, Zhou 2003} Os macromodelos são a base do desenvolvimento de circuitos elétricos de controle dos dispositivos, ou para linearização do padrão de *pixels* gerados em uma linha de varredura.^{Zhou 2004}

Por atuar na ressonância, o comportamento dos dispositivos aqui apresentados depende fortemente do amortecimento a que a estrutura está sujeita. A previsão da máxima deflexão que pode ser alcançada passa pelo entendimento das interações fluido-estrutura, e dos fenômenos viscoelásticos^{Veijola 1995} envolvidos em seu funcionamento, bem como de outros fenômenos responsáveis pela dissipação de energia no dispositivo. Os mecanismos responsáveis pelo amortecimento do *scanner*

não foram o foco deste trabalho, mas seu estudo é fundamental para que seu desempenho possa ser totalmente previsto.

Os modelos estruturais por elementos finitos puderam prever de maneira satisfatória os modos de vibração da estrutura com um e dois rotores, em Si e em Bronze-fosforoso. A incorporação das interações fluido-estruturais ao modelo seria importante para uma melhor compreensão de seu funcionamento e a previsão do desempenho do dispositivo. O projeto do empacotamento do dispositivo está vinculado a esta modelagem.

O modelo eletromagnético do circuito de atuação mostrou bons resultados para o dispositivo fracamente acoplado em 60 Hz. Melhoramentos são necessários nas propriedades dos materiais utilizados para previsão do torque indutivo gerado pelos dispositivos fortemente acoplados e fracamente acoplados com operação em 1 kHz.

7.5 Contribuições ao projeto

O estabelecimento de uma sistemática de projeto baseada nos modelos desenvolvidos é um avanço importante na tecnologia dos *scanners* indutivos planares indutivos. Neste sentido, podem ser apontadas como contribuições deste trabalho:

- Desenvolvimento de metodologia de projeto para o *scanner* com um rotor;
- Desenvolvimento de metodologia de projeto para o *scanner* com dois rotores;

A metodologia de projeto para o *scanner* com um rotor foi proposta e validada para o *scanner* indutivo fabricado por Barbaroto. Os modelos desenvolvidos e a sistematização do projeto puderam prever adequadamente o comportamento do dispositivo.^{Oliveira 2006}

O projeto dos *scanners* com dois rotores pode ser realizado com base nos modelos por elementos finitos desenvolvidos para o dispositivo, entretanto, o modelo ainda não pode prever adequadamente o torque gerado pelo dispositivo fortemente acoplado, e conseqüentemente a deflexão da estrutura. Os modelos elétrico analítico e por elementos finitos do atuador devem ser melhorados através da introdução de propriedade dos materiais nas condições de operação do dispositivo, que devem ser obtidas pela caracterização magnética dos materiais.

7.6 Sugestões para próximos trabalhos

Este trabalho apresentou contribuições importantes à tecnologia de *scanners* indutivos planares. Novas perspectivas de pesquisa surgem a partir destas contribuições:

- Estudo das interações fluido-estruturais no dispositivo;
- Estudo das não-linearidades na constante torsional;
- Estudo das não-linearidades magnéticas no dispositivo;
- Estudo das características de fadiga do dispositivo;
- Desenvolvimento do modelo por elementos finitos fluido-estrutural;
- Desenvolvimento de um modelo acoplado elétrico-estrutural por elementos finitos;
- Desenvolvimento de um modelo acoplado elétrico-estrutural-fluídico por elementos finitos;
- Desenvolvimento de macro-modelos para o dispositivo forte e fracamente acoplados;
- Implementação de um encoder óptico para permitir o controle do dispositivo;
- Desenvolvimento de circuitos para controle do dispositivo;
- Estudo sobre a utilização do Bronze-fosforoso como espelho no dispositivo;
- Estudo sobre a utilização do *scanners* em outros comprimentos de onda;
- Desenvolvimento de aplicações que utilizem o *scanner* indutivo.

7.7 Conclusões

Neste trabalho foram propostas inovações e aprimoramentos à tecnologia dos *scanners* ressonantes planares atuados por indução. As contribuições propostas permitiram a redução do consumo de potência de 2.2 W para cerca de 5 mW por grau óptico, e aumentar a frequência de operação do circuito de pouco mais de 1 kHz para 4 kHz, com possibilidade de chegar a frequências tão altas como 8 ou 16 kHz, através de um projeto adequado do atuador e da estrutura. O ângulo de deflexão obtido está na faixa de 20° óptico pico-a-pico. Estes parâmetros estão compatíveis com parâmetros apresentados por dispositivos similares comercialmente disponíveis.

A fabricação dos *scanners* no Brasil foi viabilizada pela utilização do Bronze-fosforoso e de processos de fabricação comumente utilizados pela indústria gráfica no país. A possibilidade de, em uma mesma estrutura de Bronze-fosforoso, acoplar o espelho e a armadura é uma característica singular da tecnologia proposta que possibilita um processo de fabricação mais simples e reflete-se no custo final dos dispositivos.

Os modelos desenvolvidos foram utilizados em metodologias de projeto que se mostraram adequadas ao projeto dos dispositivos, entretanto, deve haver melhorias com relação às propriedades dos materiais utilizados. Propõe-se que sejam desenvolvidos procedimentos experimentais para a obtenção destas propriedades nas condições de operação dos dispositivos.

Os modelos propostos devem ser melhorados pela incorporação das interações fluido-estrutural, o que possibilitaria uma previsão mais acurada do fator de qualidade do dispositivo, e conseqüentemente do ângulo de deflexão. O projeto do empacotamento do dispositivo está vinculado a esta melhoria.

Uma metodologia para caracterização dos *scanners* foi desenvolvida e pode ser utilizada não somente com dispositivos indutivos, mas com galvanométricos e acústicos.

Várias possibilidades podem ser exploradas a partir dos resultados deste trabalho, basicamente em duas frentes: desenvolvimento de aplicações que utilizem os *scanners* propostos e, implementação de melhorias no dispositivo e nos modelos dos fenômenos físicos envolvidos.

Na linha de melhorias ao dispositivo, podem ser desenvolvidas metodologias para otimização do projeto do dispositivo através de técnicas como algoritmo genético, ou redes neurais. Da mesma forma podem ser estudadas novas geometrias da estrutura e do mecanismo de atuação que permitam alcançar maiores deflexões em frequências mais altas. A análise da confiabilidade do dispositivo, através da análise da fadiga do material é importante para previsão de seu tempo de vida, e também é linha de pesquisa derivada deste trabalho.

Do ponto de vista de aplicações, projetores de imagens, leitores de código de barras, são aplicações típicas deste tipo de *scanner* . Novas aplicações podem ser idealizadas com base no elevado fator de qualidade apresentado pelo dispositivo, como micro-balanças ou sensores de vácuo e viscosidade.

Publicações Resultantes deste trabalho

- OLIVEIRA, L. C. M.; BARBAROTO, P. R.; FERREIRA, L. O. S.; DOI, I. 2006. A novel Si micromachined moving-coil induction actuated mm-sized resonant scanner. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, vol. 16, no. 1, p. 165–172.
- OLIVEIRA, L. C. M.; AHMIDA, K. M.; FERREIRA, L. O. S. 2005b. Electromagnetic and structural fea modeling of induction actuated scanning mirrors. In SAGAN, Stephen F.; MARSHAL, Gerald F. (Ed.). *Proceedings of SPIE - Optical Scanning 2005*. SPIE, Bellingham, WA: [s.n.], 2005b. vol. 5873, p. 66–71.
- OLIVEIRA, L. C. M.; AHMIDA, K. M.; FERREIRA, L. O. S. 2005a. Dynamic analysis of silicon micromachined double-rotor scanning mirror. In RADE, D. A.; JR., V. Steffen (Ed.). *Proceedings of the XI DINAME*. Ouro Preto, MG, Brazil: ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2005a.
- OLIVEIRA, L. C. M.; FERREIRA, L. O. S. 2005. Finite element analysis of an electromagnetic actuator. *Proceedings of the 18th Congress of Mechanical Engineering*. Ouro Preto, MG, Brasil: ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2005.
- OLIVEIRA, L. C. M.; FERREIRA, L. O. S. 2004. Finite element analysis of induction actuated scanners. In *Proceedings of the Panamerican Studies on MEMS*. [S.l.: s.n.], 2004.
- AVELAR, C. S. C.; OLIVEIRA, L. C. M.; FERREIRA, L. O. S. 2004. Desenvolvimento de software para controle e automação de medidas de desempenho em scanners. *Proceedings of the 56 Reunião da SBPC*. Cuiabá, MT, Brasil: SBPC - Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, 2004. vol. 1.
- OLIVEIRA, L. C. M.; FERREIRA, L. O. S. 2003. Silicon micromachined double-rotor scanner. In SPIE, BELLINGHAM, WA. *Proceedings of SPIE - IV Optomechatronics Conference*. Providence, RI, USA: SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2003. vol. 5264, no. 3, p. 332–342.

Referências Bibliográficas

- AHMIDA, Khaled M; FERREIRA, Luiz Otávio S. 2004. Design And Modeling of an Acoustically Excited Double-Paddle Scanner. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, vol. 14, no. 10, p. 1337–1344. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0960-1317/14/1337>.
- AKSYUK, V; BARBER, B; GILES, CR; RUEL, R; STULZ, L; BISHOP, D. 1998. Low Insertion Loss Packaged and Fibre Connectorised MEMS Reflective Optical Switch. *Electronics Letters Electronics Letters*, 1998, vol. 34, no. 14, p. 1413–1414.
- AKSYUK, VA; PARDO, F; CARR, D; GREYWALL, D; CHAN, HB; SIMON, ME; GASPARYAN, A; SHEA, H; LIFTON, V; BOLLE, C; ARNEY, S; FRAHM, R; PACZKOWSKI, M; HAUEIS, M; RYF, R; NEILSON, DT; KIM, J; GILES, CR; BISHOP, D. 2003. Beam-Steering Micromirrors for Large Optical Cross-Connects. *Journal Of Lightwave Technology*, 2003, vol. 21, no. 3, p. 634–642.
1998. ANSYS 5.0 User's Manual - Procedures. [S.l.], 1998.
1998. ANSYS 5.0 User's Manual - Theory Reference. [S.l.], 1998.
- ARRUDA, J. R. F.; PAVANELLO, R.; FERREIRA, L. O. S. 2002. Analytical and Experimental Modal Analysis of a Silicon Microstructure. In *Proceedings of ISMA*. [S.l.: s.n.], 2002. vol. 2, p. 943–949.
- ASADA, N.; MATSUKI, H.; MINAMI, K.; ESASHI, M. 1994. Silicon Micromachined Two-Dimensional Galvano Optical Scanner. *IEEE Transactions on Magnetics*, November 1994, vol. 30, no. 6, p. 4647–4649.
- ASADA, N.; TAKEUCHI, M.; VAGNOV, V.; BELOV, N.; HOUT, S. I.; SLUCHAK, I. 2000. Silicon Micro-Optical Scanner. *Sensors and Actuators A*, 2000, no. 83, p. 284–290.
- ATAMAN, Caglar; UREY, Hakan. 2006. Modeling and characterization of comb-actuated resonant microscanners. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, vol. 16, no. 1, p. 9–16. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0960-1317/16/9>.
- AVELAR, Carolina S. Carneiro; OLIVEIRA, Luiz Claudio Marangoni de; FERREIRA, Luiz Otávio Saraiva. 2004. Desenvolvimento de software para controle e automação de medidas de desempenho em scanners. In *Proceedings of the 56 Reunião da SBPC*. [S.l.: s.n.], 2004. vol. 1.

- BARBAROTO, Pedro Ricardo. 2002a. *Projeto, Microfabricação e Caracterização de Defletor de Luz de Silício Acionado por Indução*. Maio 2002. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação - UNICAMP, Campinas, SP, Maio 2002.
- BARBAROTO, Pedro R.; FERREIRA, L. O. S.; DOI, Ioshiaki. 2002b. Micromachined Scanner Actuated by Electromagnetic Induction. In *Optomechatronic Systems III, Proceedings of SPIE*. Washington, USA: SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2002b. vol. 4092, p. 691–698.
- BARBAROTO, Pedro Ricardo; FERREIRA, Luiz Otávio S.; DOI, I. 2003. Si-LiG Process for Inductive Meso Systems. *Applied Surface Science*, Jul 2003, vol. 1, p. 406–410.
- BARILLARO, Giuseppe; MOLFESE, Antonio; NANNINI, Andrea; PIERI, Francesco. 2005. Analysis, simulation and relative performances of two kinds of serpentine springs. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, vol. 15, no. 4, p. 736–746. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0960-1317/15/736>.
- BATHE, K. J. 1982. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. [S.l.]: Prentice-Hall.
- BEER, Ferdinand P.; E. RUSSELL JOHNSTON, Jr. 1985. *Mechanics of Materials*. New York, NY, USA: McGraw-Hill. (Materials Science Series).
- BEISER, Leo. 1984. Resolution of Laser Scanners. *Optical Engineering*, 1984, vol. 23, no. 3, p. 266–268.
- _____. 1985. Laser Scanning and Recording: Development and Trends. *Laser Focus/Electro-Optics*, February 1985, p. 88–96.
- _____. 1988. *Holographic Scanning*. [S.l.]: Wiley and Sons.
- _____. 1992. *Laser Scanning Notebook*. P.O.Box 10, Bellingham, Washington, 98227-0010, 1992.
- BELMANS, R.; FINDLAY, R.D.; GEYSEN, W. 1990. A Circuit Approach to Finite Element Analysis of a Double Squirrel. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1990, vol. 5, no. 4, p. 719–724.
- BORESI, A. P.; CHONG, K. 2000. *Elasticity in Engineering*. [S.l.]: Wiley and Sons.
- BOUROUINA, T; GARNIER, A; FUJITA, H; MASUZAWA, T; PEUZIN, J-C. 2000. Mechanical Nonlinearities in a Magnetically Actuated Resonator. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2000, vol. 10, no. 2, p. 265–270.
- BROSENS, Pierre. 1976. Scanning Accuracy of the Moving-Iron Galvanometer Scanner. *Optical Engineering*, March-April 1976, vol. 15, no. 2, p. 95–98.
- BROSENS, Pierre J. 1972. Dynamic Mirror Distortions in Optical Scanning. *Applied Optics*, 1972, vol. 11, no. 12, p. 2987–&.

- Brown, M. K.; Gong, T. J.; Neal, D. R.; Roller, J. P.; Luanava, S.; Urey, H. 2001. Measurement of the dynamic deformation of a high-frequency scanning mirror using a shack-hartmann wavefront sensor. In *Proc. SPIE Vol. 4451, p. 480-488, Optical Manufacturing and Testing IV, H. Philip Stahl; Ed.* [S.l.: s.n.], 2001. p. 480-488.
- CHAN, HB; AKSYUK, VA; KLEIMAN, RN; BISHOP, DJ; CAPASSO, F. 2001a. Nonlinear Micromechanical Casimir Oscillator. *Physical Review Letters*, 2001, vol. 8721, no. 21.
- _____. 2001b. *Quantum Mechanical Actuation of Microelectromechanical Systems By the Casimir Force (vol 291, pg 1941, 2001)*. 2001. 607-607 p.
- CHANG, CM; SHIEH, HPD. 2000. Design of Illumination and Projection Optics for Projectors With Single Digital Micromirror Devices. *Applied Optics Applied Optics*, 2000, vol. 39, no. 19, p. 3202-3208.
- CHANG, KM; LEE, SC; LI, SH. 2002. Squeeze Film Damping Effect on a MEMS Torsion Mirror. *Journal Of Micromechanics And Microengineering*, 2002, vol. 12, no. 5, p. 556-561.
- CHIOU, JC; LIN, YC. 2003. A Multiple Electrostatic Electrodes Torsion Micromirror Device With Linear Stepping Angle Effect. *Journal Of Microelectromechanical Systems*, 2003, vol. 12, no. 6, p. 913-920.
- CHO, Hyoung J; AHN, Chong H. 2003. Magnetically-driven Bi-Directional Optical Microscanner. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2003, vol. 13, no. 3, p. 383-389.
- CHO, Young-Ho; PISANO, A.P.; HOWE, R.T. 1994. Viscous damping model for laterally oscillating microstructures. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 1994, vol. 3, no. 2, p. 81-87. ISSN 1057-7157.
- CHRONIS, N; LEE, LP. 2004. Total Internal Reflection-Based Biochip Utilizing A Polymer-Filled Cavity With a Micromirror Sidewall. *LAB ON A CHIP*, 2004, vol. 4, no. 2, p. 125-130.
- CINGOSKI, Vlatko. 1996. *Study on Improved Three-Dimensional Electromagnetic Field Computations Utilizing Vector Edge Finite Elements*. January 1996. Tese (Doutorado) — Hiroshima University, January 1996.
- COEY, J. M. D. 2002. Permanent magnet applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, ago. 2002, vol. 248, no. 3, p. 441-456. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TJJ-4633MGC-2/2/a46bf1236954c1905dfcb858f2cb5b18>.
- COOK, R. D. 1981. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. New York: John Wiley and Sons.
- CORMAN, Thierry; ENOKSSON, Peter; STEMME, Goran. 1997. Gas damping of electrostatically excited resonators. *Sensors and Actuators A: Physical*, jun. 1997, vol. 61, no. 1-3, p. 249-255. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THG-3S9D11W-1G/2/9f9869ad938c53b7c43cc3caa4d447a4>.

- COULOMB, J. 1983. A Methodology for the Determination of Global Electromechanical Quantities from a Finite Element Analysis and its Application to the Evaluation of Magnetic Forces, Torques and Stiffness. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1983, vol. 19, no. 6, p. 2514–2519.
- COULOMB, J.; MEUNIER, G. 1984. Finite element implementation of virtual work principle for magnetic or electric force and torque computation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1984, vol. 20, no. 5, p. 1894–1896.
- DAI, EG; MATIN, MA; GUAN, Y. 2002. Research on the Dynamic Performance of MEMS Micromirrors. *Microwave And Optical Technology Letters*, 2002, vol. 35, no. 2, p. 111–113.
- DEBRAY, A.; LUDWIG, A.; BOUROUNA, T.; ASAOKA, A.; TIERCELIN, N.; REYNE, G.; OKI, T.; QUANDT, E.; MURO, H.; FUJITA, H. 2004. Application of a multilayered magnetostrictive film to a micromachined 2-D optical scanner. *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, 2004, vol. 13, no. 2, p. 264–271. ISSN 1057-7157.
- DICKENSHEETS, D.L.; KINO, G.S. 1998. Silicon-Micromachined Scanning Confocal Optical Microscope. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 1998, vol. 7, no. 1, p. 38–47.
- DUDLEY, D. 2004. Micromirror Technology Enables More Than Projectors. *Photonics Spectra*, 2004, vol. 38, no. 5, p. 76–78.
- DUDLEY, Dana; DUNCAN, Walter M; SLAUGHTER, John. 2003. Emerging digital micromirror device (dmd) applications. In UREY, Hakan (Ed.). *MOEMS Display and Imaging Systems*. [S.l.]: SPIE, Society of Optical Engineers, 2003. vol. 4985, p. 14–25.
1991. ELECTROMAGNETIC Microactuators with Multiple Degrees of Freedom. 614–617 p.
- ENGE, O; MAISSER, P; JUNGNIKEL, U. 2001. Non-Linear Control of Electrically Driven Micromirrors by Means of Inverse Dynamics. *International Journal Of Applied Electromagnetics And Mechanics*, 2001, vol. 13, no. 1-4, p. 107–112.
- FERRARI, V.; GHISLA, A.; MARIOLI, D.; TARONI, A. 2005. Silicon Resonant Accelerometer With Electronic Compensation of Input-Output Cross-Talk. *Sensors and Actuators A: Physical*, September 2005, vol. 123-124, p. 258–266. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THG-4G94HNM-2/2/93b682a2e8a5d91daa6fd86e3821f7d2>.
- FERREIRA, Luiz Otávio Saraiva. 1994. *Microscanner de Silício*. 1994. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica., Campinas, SP, 1994.
- FERREIRA, Luiz Otavio S. 2000. *Inductive resonant scanner*. 2000. U.S. Patent no. 4,502,752.
- FERREIRA, L. O. S.; MOEHLECKE, S. 1999. A Silicon Micromechanical Galvanometric Scanner. *Sensors and Actuators A Sensors and Actuators A*, 1999, vol. 73, p. 252–260.

- FERREIRA, L. O. S.; POURLBORZ, Farzad; ASHAR, Premal; KHAN-MALEK, Chantal. 1998. Torsional Scanning Mirrors Actuated by Electromagnetic Induction and Acoustic Waves. In *ICMP98 - International Conference on Microelectronics and Packaging*. [S.l.]: XIII SBMICRO, 1998. p. 155–162.
- FILHOL, F.; DEFAY, E.; DIVOUX, C.; ZINCK, C.; DELAYE, M.-T. 2005. Resonant Micro-Mirror Excited By A Thin-Film Piezoelectric Actuator for Fast Optical Beam Scanning. *Sensors and Actuators A: Physical*, September 2005, vol. 123-124, p. 483–489. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THG-4GYNY35-1/2/104d198bb6f3eb1f97d7025b08ea7073>.
- FORD, JE; AKSYUK, VA; BISHOP, DJ; WALKER, JA. 1999. Wavelength Add-Drop Switching Using Tilting Micromirrors. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, vol. 17, no. 5, p. 904–911.
- GOLUBOK, AO; RODIONOVA, EN; SAPOZHNIKOV, ID. 2002. Microscanner With Large Scanning Field for a Probe Microscope. *Journal Of Optical Technology*, 2002, vol. 69, no. 3, p. 198–200.
- GROVE, Frederic W. 1946. *Inductance Calculations*. 1st. ed. New York: D. Van Nostrand Company. 621.319G919i (BAE).
- GUCKEL, H. 1998. Progress in magnetic actuators. *Microsystem Technologies*, 1998, p. 59–61.
- HAH, D; HUANG, STY; TSAI, JC; TOSHIYOSHI, H; WU, MC. 2004. Low-voltage, Large-Scan Angle MEMS Analog Micromirror Arrays With Hidden Vertical Comb-Drive Actuators. *Journal Of Microelectromechanical Systems*, 2004, vol. 13, no. 2, p. 279–289.
- HAIBERGER, L.; JAGER, D.; SCHILLER, S. 2005. Fabrication and laser control of double-paddle silicon oscillators. *Review of Scientific Instruments*, 2005, AIP, vol. 76, no. 4, p. 045106. Disponível em: <http://link.aip.org/link/?RSI/76/045106/1>.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; MERRILL, John. 1994. *Fundamentos da Física*. 3rd edition. [S.l.]: Wiley and Sons.
- HAMDI, Essam S. 1998. *Design of Small Electrical Machines*. 1st. Baffins Lane, Chichester, England: Wiley and Sons Ltd.
- HAO, Zhili; WINGFIELD, Brian; WHITLEY, Michael; BROOKS, Justin; HAMMER, Jay A. 2003. A Design Methodology for a Bulk Micromachined Two-Dimensional Electrostatic Torsion Micromirror. *Journal of Microelectromechanical Systems*, Oct 2003, vol. 12, no. 5, p. 692–701.
- HO, Chih-Ming; KATTI, Rommey R. 1996. Electromagnetic MEMS Scanning Mirrors for Holographic Data Storage. In *IEEE Technical Digest, Solid-State Sensor and Actuator Workshop*. Hilton Head, South Carolina: Transducer Research Foundation, 1996. (Technical Digest, Solid-State Sensor and Actuator Workshop), p. 183–190.

- HOLZER, R.; SHIMOYAMA, I.; MIURA, H. 1995. Lorentz Force Actuation of Flexible Thin-Film Aluminum. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 95*. [S.l.: s.n.], 1995. vol. 2, p. 156–161.
- HORSLEY, D. A.; DAVIS, W. O.; HOGAN, K. J.; HART, M. R.; YING, E. C.; CHAPARALA, M.; BEHIN, B.; DANEMAN, M. J.; KIANG, M. H. 2005. Optical and Mechanical Performance of a Novel Magnetically Actuated Mems-Based Optical Switch. *Journal Of Microelectromechanical Systems*, 2005, vol. 14, no. 2, p. 274–284.
- HUANG, J. M.; LIU, A. Q.; DENG, Z. L.; ZHANG, Q. X.; AHN, J.; ASUNDI, A. 2004. An Approach to the Coupling Effect Between Torsion And Bending For Electrostatic Torsional Micromirrors. *Sensors And Actuators A-Physical*, 2004, vol. 115, no. 1, p. 159–167.
- HUEBSCHMAN, M; MUNJULURI, B; GARNER, H. 2004. Digital Micromirrors Enable Holographic Video Display. *LASER FOCUS WORLD*, 2004, vol. 40, no. 5, p. 111–+.
- IDIR, K.; CHANG, Liuchen; DAI, Heping. 1998. Improved Neural Network Model for Induction Motor Design. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 1998, vol. 34, no. 5, p. 2948–2951.
- JAEGER, Richard C. 1993. *Introduction to Microelectronic Fabrication*. [S.l.]: Addison Wesley Longman. (Modular Series on Solid State Devices, vol. 5).
- JANG, YH; KIM, YK. 2003. Design, Fabrication and Characterization of an Electromagnetically Actuated Addressable Out-of-plane Micromirror Array for Vertical Optical Source Applications. *Journal Of Micromechanics And Microengineering*, 2003, vol. 13, no. 6, p. 853–863.
- JI, CH; KIM, YK; CHUNG, GB. 2000. Design and Fabrication of Electromagnetic Micromirror with Bulk Silicon Mirror Plate and Aluminum Spring. *Japanese Journal Of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes &Eoleol Review Papers*, 2000, vol. 39, no. 12B, p. 7138–7141.
- Ji, Chang-Hyeon; KIM, Yong-Kweon. 2003. Electromagnetic Micromirror Array with Single-crystal Silicon Mirror Plate and Aluminum Spring. *Journal of Lightwave Technology*, March 2003, vol. 21, no. 3, p. 584–590.
- JIN, J. 1993. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc.
- JR., A. L. Xavier; FERREIRA, L. O. S. 1999. *Amortecimento não linear no microscanner de silício*. [S.l.], 1999.
- ROCKWELL JR., James. 1981. Laser Lighting: Art, Entertainment and Architecture in the 1980s. *Electro Optical Systems Design*, October 1981, p. 37–50.
- JUDY, Jack W. 2001. Microelectromechanical Systems (MEMS): fabrication, design and applications. *Smart Materials and Structures*, 2001, no. 10, p. 1115–1134.
- JUDY, Jack W.; MULLER, Richard S.; ZAPPE, Hans H. 1995. Magnetic Microactuation of Polysilicon Flexure Structures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, December 1995, vol. 4, no. 4, p. 162–169.

- KADAR, Zsolt; KINDT, Wilko; BOSSCHE, Andre; MOLLINGER, Jeff. 1996. Quality factor of torsional resonators in the low-pressure region. *Sensors and Actuators A: Physical*, maio 1996, vol. 53, no. 1-3, p. 299–303. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THG-3TTDFRM-17/2/d4661f6691e0e8099321d2c90e4d0707>.
- KALLWEIT, David; ZAPPE, Hans. 2006. Fabrication of bulk-Si micromirrors with an integrated tilt sensing mechanism. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, vol. 16, no. 2, p. 463–469. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0960-1317/16/463>.
- KIANG, Meng-Hsiung; SOLGAARD, O.; LAU, K.Y.; MULLER, R.S. 1998. Electrostatic Combdrive-actuated Micromirrors for Laser-beam. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1998, vol. 7, no. 1, p. 27–37.
- KIM, JS; KIM, JJ. 2004. Fabrication of Multimode Polymeric Waveguides and Micromirrors Using Deep X-Ray Lithography. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, vol. 16, no. 3, p. 798–800.
- KLEIMAN, R. N.; KAMINSKY, G. K.; REPPY, J. D.; PINDAK, R.; BISHOP, D. J. 1985. Single-crystal silicon high-Q torsional oscillators. *Review of Scientific Instruments*, 1985, AIP, vol. 56, no. 11, p. 2088–2091. Disponível em: <http://link.aip.org/link/?RSI/56/2088/1>.
- KO, Young-Chul; CHO, Jin-Woo; MUN, Yong-Kweun; JEONG, Hyun-Gu; CHOI, Won Kyoung; KIM, Jung-Woo; PARK, Yong-Hwa; YOO, Ji-Beon; LEE, Jin-Ho. 2006. Eye-type scanning mirror with dual vertical combs for laser display. *Sensors and Actuators A: Physical*, jan. 2006, vol. 126, no. 1, p. 218–226. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THG-4HMFJ7P-1/2/c2b6981bd0eef5d1f661b27ec4bc6a55>.
- KOMORI, M.; HIRAKAWA, T. 2005. A Magnetically Driven Linear Microactuator with New Driving Method. *IEEE-ASME Transactions On Mechatronics*, 2005, vol. 10, no. 3, p. 335–338.
- KOSHIKAWA, T; KIDO, Y; TADA, R. 2003. High-resolution Rapid Elemental Analysis Using an Xrf Microscanner. *Journal Of Sedimentary Research*, 2003, vol. 73, no. 5, p. 824–829.
- KOVACS, G. T. A.; MALUF, N. I.; PETERSEN, K. E. 1998. Bulk Micromachining of Silicon. *Proceedings of IEEE*, 1998, vol. 86, no. 8, p. 1536–1551.
- KUO, Ju-Nan; LEE, Gwo-Bin; PAN, Wen-Fung. 2005. Projection display technique utilizing three-color-mixing waveguides and microscanning devices. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2005, vol. 17, no. 1, p. 217–219. ISSN 1041-1135.
- LEE, C; LIN, YS; LAI, YJ; TASI, MH; CHEN, CC; WU, CY. 2004. 3-V Driven Pop-Up Micromirror For Reflecting Light Toward Out-of-plane Direction for VOA Applications. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, vol. 16, no. 4, p. 1044–1046.
- LEE, Jin-Ho; KO, Young-Chul; CHOI, Byoung-So; KIM, Jong-Min; JEON, Duk Young. 2002. Bonding of Silicon Scanning Mirror Having Vertical Comb Fingers. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2002, vol. 12, no. 5, p. 644–649.

- LENAERTS, Bert; PUERS, Robert. 2005. Inductive Powering of a Freely Moving System. *Sensors and Actuators A: Physical*, September 2005, vol. 123-124, p. 522–530. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THG-4FM0P02-3/2/3d42c3a4c34da9e8c00806a18cf5d406>.
- LESCURE, M; GANIBAL, C; PRAJOUX, R; BRIOT, M. 2003. Compact Robotics Perception System Based on a Laser Range Finder Coupled with Silicon Micromirrors. *Optical Engineering*, 2003, vol. 42, no. 9, p. 2653–2658.
- LIU, HW; BHUSHAN, B. 2004. Nanotribological Characterization of Digital Micromirror Devices Using an Atomic Force Microscope. *Ultramicroscopy*, 2004, vol. 100, no. 3-4, p. 391–412.
- LORRAIN, Paul; CORSON, Dale R.; LORRAIN, François. 1988. *Electromagnetic Fields and Waves*. 3rd. ed. [S.l.]: W. M. Freeman and Company. 580.141L893e3 (IFGW).
- MACFADYEN, K. A. 1953. *Small Transformers and Inductors*. 1st. ed. London: Chapman & Hall. 621.314M162s (BAE).
- MADOU, Marc. 1997. *Fundamentals of Microfabrication*. [S.l.]: CRC Press.
1991. MAGNETIC Micro-Actuator. 120–124 p.
- MARSHALL, Gerald. 2005. Sc725 - optical and laser scanning technology: Devices, systems and applications. In SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING. *Short Course Notes*. [S.l.], 2005.
- MARSHALL, Gerald F. 1985. *Laser Beam Scanning - Opto-Mechanical Devices, Systems, and Data Storage Optics*. [S.l.]: Marcel Dekker, Inc. (Optical Engineering, vol. 8).
- _____. 2004. *Handbook of Optical and Laser Scanning*. 1st. New York, NY: Marcel Dekker, Inc. ISBN 0-8247-5569-3.
- MCCARTHY, DC. 2000. Micromirrors Enable Microprojectors. *Photonics Spectra Photonics Spectra*, 2000, vol. 34, no. 8, p. 44–44.
- MILANOVIC, V; KWON, S; LEE, LP. 2004. High Aspect Ratio Micromirrors with Large Static Rotation and Piston Actuation. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, vol. 16, no. 8, p. 1891–1893.
- MILLER, R. A.; TAI, Y. C. 1997. Micromachined Electromagnetic Scanning Mirrors. *Optical Engineering*, 1997, vol. 36, no. 5, p. 1399–1407.
- MIYAJIMA, H. 2004. Development of a MEMS Electromagnetic Optical Scanner for a Commercial Laser Scanning Microscope. *Journal Of Microlithography Microfabrication And Microsystems*, 2004, vol. 3, no. 2, p. 348–357.

- MIYAJIMA, Hiroshi; ARIKAWA, Tomoko; HIDAKA, Toshiharu; TOKUDA, Kazunari; MATSUMOTO, Kazuya. 2005. Experimental Characterization of Polyimide Torsional Hinges for Optical Scanner. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, vol. 117, no. 2, p. 341–348. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THG-4CYOQYV-B/2/c9712ce88900e98679ddce9d788a0a9f>.
- MIYAJIMA, H.; ASAOKA, N.; ARIMA, M.; MINAMOTO, Y.; MURAKAMI, K.; TOKUDA, K.; MATSUMOTO, K. 2001. A Durable, Shock-Resistant Electromagnetic Optical Scanner with Polyimide-based Hinges. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, vol. 10, no. 3, p. 418–424. ISSN 1057-7157.
- MIYAJIMA, H.; ASAOKA, N.; ISOKAWA, T.; OGATA, M.; AOKI, Y.; IMAI, M.; FUJIMORI, O.; KATASHIRO, M.; MATSUMOTO, K. 2003. A Mems Electromagnetic Optical Scanner for a Commercial Confocal Laser Scanning Microscope. *Journal of Microelectromechanical Systems*, June 2003, vol. 12, no. 3, p. 243–251.
- MIYAJIMA, H.; MURAKAMI, K.; KATASHIRO, M. 2004. MEMS Optical Scanners for Microscopes. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, vol. 10, no. 3, p. 514–527.
- MOHITE, S S; KESARI, Haneesh; SONTI, V R; PRATAP, Rudra. 2005. Analytical solutions for the stiffness and damping coefficients of squeeze films in MEMS devices with perforated back plates. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, vol. 15, no. 11, p. 2083–2092. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0960-1317/15/2083>.
- MONTAGU, Jean. 2004. Handbook of optical and laser scanning. In _____. [S.l.]: Marcel Dekker, Inc, 2004. cap. 8, p. 417–476.
- MONTAGU, Jean I. 1985. *Tunable resonant device*. 1985. U.S. Patent no. 4,502,752.
- MULLER, R. S.; LAU, K. Y. 1998. Surface-Micromachined Microoptical Element and Systems. *Proceedings of IEEE*, 1998, vol. 86, no. 8, p. 1705–1720.
- NAGLE, S.F.; LIVERMORE, C.; FRECHETTE, L.G.; GHODSSI, R.; LANG, J.H. 2005. An Electric Induction Micromotor. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 2005, vol. 14, no. 5, p. 1127–1143. ISSN 1057-7157.
- NAYFEH, AH; YOUNIS, MI. 2004. A New Approach to the Modeling and Simulation of Flexible Microstructures Under the Effect of Squeeze-Film Damping. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, vol. 14, no. 2, p. 170–181.
- OFFEREINS, H. L.; SANDMAIER, H.; MARUSCZYK, K.; KUHL, K.; PLETTNER, A. 1992. Compensating Corner Under-Cutting of (100) Silicon in KOH. *Sensors and Actuators - A*, 1992, vol. 3, no. 3, p. 127–144.
- OGATA, Katsuhiko. 1982. *Engenharia de Controle Moderno*. [S.l.]: Prentice Hall.

- OKANO, Y; HIRABAYASHI, Y. 2002. Magnetically Actuated Micromirror and Measurement System for Motion Characteristics Using Specular Reflection. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, vol. 8, no. 1, p. 19–25.
- OLIVEIRA, L C M; BARBAROTO, P R; FERREIRA, L O S; DOI, I. 2006. A novel Si micromachined moving-coil induction actuated mm-sized resonant scanner. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, vol. 16, no. 1, p. 165–172. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0960-1317/16/165>.
- OLIVEIRA, L. C. M.; FERREIRA, L. O. S. 2003. Silicon Micromachined Double-Rotor Scanner. In *Proceedings of the IV Optomechatronics Conference*. [S.l.: s.n.], 2003. vol. 21, no. 3, p. 634–642.
- OLIVEIRA, Luiz Claudio Marangoni de; AHMIDA, Khaled; FERREIRA, Luiz Otávio Saraiva. 2005a. Dynamic analysis of silicon micromachined double-rotor scanning mirror. In *Proceedings of the XI DINAME*. [S.l.: s.n.], 2005a.
- _____. 2005b. Electromagnetic and structural fea modeling of induction actuated scanning mirrors. In *Proceedings of the SPIE Optical Scanning*. [S.l.: s.n.], 2005b.
- OLIVEIRA, Luiz Claudio Marangoni de; FERREIRA, Luiz Otávio Saraiva. 2004. Finite element analysis of induction actuated scanners. In *Proceedings of the Panamerican Studies on MEMS*. [S.l.: s.n.], 2004.
- _____. 2005. Finite element analysis of an electromagnetic actuator. In *Proceedings of the 18th Congress of Mechanical Engineering*. [S.l.: s.n.], 2005.
- PAN, C. T.; SHEN, S. C. 2005. Magnetically Actuated Bi-Directional Microactuators with Permalloy and Fe/Pt Hard Magnet. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005, vol. 285, no. 3, p. 422–432.
- PAN, Feixia; KUBBY, Joel; PEETERS, Eric; TRAN, Alex T; MUKHERJEE, Subrata. 1998. Squeeze Film Damping Effect on the Dynamic Response of a Mems Torsion Mirror. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1998, vol. 8, no. 3, p. 200–208.
- PARRAIN, F.; MEGHERBI, S.; RAYNAUD, G.; MATHIAS, H.; GILLES, J.-P.; BOSSEBOEUF, A.; SCHROPFER, G.; FAURE, N.; CUSIN, P. 2004. Hardware description language modeling of an electrostatically actuated bi-axial micromirror. In *Thermal and Mechanical Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, 2004. EuroSimE 2004. Proceedings of the 5th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 393–397.
- PETERSEN, Kurt E. 1980. Silicon Torsional Scanning Mirror. *IBM J. Res. Develop.*, September 1980, vol. 24, no. 5, p. 631–637.
- PRASCIOLU, M; CARPENTIERO, A; KUMAR, R; COJOC, D; CABRINI, S; BUSINARO, L; ROMANATO, F; FABRIZIO, E Di; RECCHIA, D; PARMIGIANI, G. 2004. Electromagnetically Actuated Surface Micromachined Free Standing Torsion Beam Micromirror Made by Electroplated Nickel. *Japanese Journal Of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes and Review Papers*, 2004, vol. 43, no. 1, p. 418–423.

- REID, G T; MARSHALL, S J; RIXON, R C; STEWART, H. 1988. A Laser Scanning Camera for Range Data Acquisition. *Journal of Physics D: Applied Physics* *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1988, vol. 21, no. 10S, p. S1–S3.
- MARK H. RICHARDSON, Brian J. Schwarz aand. 1999. Experimental Modal Analysis. In *Proceedings of CSI Reliability Week*. Orlando, FL: [s.n.], 1999.
- ROARK, R. J.; YOUNG, W. C. 1989. *Formulas for Stress and Strain*. 6. ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- ROHR, BE. 1992. Scanner Controversy. *Photonics Spectra*, 1992, vol. 26, no. 9, p. 11–11.
- ROTHERS, Herbert C. 1941. *Electromagnetic Devices*. 1st. ed. New York: John Wiley & Sons. 621.3R742c (BAE) Eletromagnetismo aplicado, nucleos, solenoides,...
- SANDBERG, R; MØLHAVE, K; BOISEN, A; SVENDSEN, W. 2005. Effect of gold coating on the Q -factor of a resonant cantilever. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, vol. 15, no. 12, p. 2249–2253. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0960-1317/15/2249>.
- SASAKI, Minoru; YAMAGUCHI, T; SONG, J H; HANE, K; HARA, M; HORI, K. 2003. Optical Scanner on a Three-Dimensional Microoptical Bench. *Journal of Lightwave Technology*, March 2003, vol. 21, no. 3, p. 602–608.
- SCHENK, H.; DURR, P.; HAASE, T.; KUNZE, D.; SOBE, U.; LAKNER, H.; KUCK, H. 2000. Large Deflection Micromechanical Scanning Mirrors for Linear Scans and Pattern Generation. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, vol. 6, no. 5, p. 715–722.
- SEIDEL, H.; CSEPREGI, I.; HEUBERGER, A.; BAUMGARTEL, H. 1990a. Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions. *J. Electrochem. Soc.*, process 1990, vol. 137, no. 11, p. 3612–3626.
- _____. 1990b. Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions. II - Influence of Dopants. *Journal of Electrochemical Society*, nov. 1990, vol. 137, no. 11, p. 3626–3632.
- SENTURIA, Stephen D. 2001. *Microsystem Design*. Nowrwell, MA USA: Kluwer Academic Publishers.
- SINGH, Janak; GAN, Terence; AGARWAL, Ajay; MOHANRAJ; LIW, Saxon. 2005. 3D Free Space Thermally Actuated Micromirror Device. *Sensors and Actuators A: Physical*, September 2005, vol. 123-124, p. 468–475. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THG-4FWFVYT-2/2/06f73e4439dd429d41f086c661ae8957>.
- SKILLING, Hugh Hildreth. 1962. *Electromechanics - A First Course in Electromechanical Energy Conversion*. New York: John Wiley and Sons, INC.
- SLEMON, Gordon R. 1966. *Magnetolectric Devices*. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc.

- SMITH, Steve. 1985. *Magnetic Components - Design and Applications*. [S.l.]: Van Nostrand Reinhold Company.
- SPUDICH, TM; UTZ, CK; KUNTZ, JM; DEVERSE, RA; HAMMAKER, RM; MCCURDY, DL. 2003. Potential for Using a Digital Micromirror Device as a Signal Multiplexer in Visible Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 2003, vol. 57, no. 7, p. 733–736.
- STUTZ, Glenn. 2004. Handbook of optical and laser scanning. In _____. [S.l.]: Marcel Dekker, Inc, 2004. cap. 4, p. 265–297.
- SU, GDJ; TOSHIYOSHI, H; WU, MC. 2001. Surface-Micromachined 2-D Optical Scanners with High-Performance Single-Crystalline Silicon Micromirrors. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, vol. 13, no. 6, p. 606–608.
- SU, G. D. J; LEE, S. S. 1999. Optical Scanner Realized by Surface-Micromachined Vertical Torsion Mirror. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, vol. 11, no. 5.
- SYMON, Keith R. 1982. *Mecânica*. [S.l.]: Editora Campus.
- SYMS, RRA. 2000. Self-Assembled 3-D Silicon Microscanners with Self-Assembled Electrostatic Drives. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 11, p. 1519–1521.
- TILMANS, Harrie A C. 1996. Equivalent Circuit Representation Of Electromechanical Transducers: I. Lumped-Parameter Systems. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1996, vol. 6, no. 1, p. 157–176.
- _____. 1997. Equivalent Circuit Representation of Electromechanical Transducers: II. Distributed-Parameter Systems. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1997, vol. 7, no. 4, p. 285–309.
- TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER., J. N. 1970. *Theory of Elasticity*. Tokyo: McGraw-Hill.
- TOSHIYOSHI, H.; MIYAUCHI, D.; FUJITA, H. 1999. Electromagnetic torsion mirrors for self-aligned fiber-opticcrossconnectors by silicon micromachining. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 1999, vol. 5, no. 1, p. 10–17. ISSN 1077-260X.
- TRIMMER, W. S. N. 1989. Microrobots and micromechanical systems. *Sensors and Actuators*, set. 1989, vol. 19, no. 3, p. 267–287. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6W97-44YRGTW-3N/2/1f7d1a32889c2ceb37d55248b0fcbbda>.
- TSAI, J.-C.; WU, M.C. 2005. Gimbal-Less MEMS Two-Axis Optical Scanner Array With High Fill-Factor. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 2005, vol. 14, no. 6, p. 1323–1328. ISSN 1057-7157.
- TU, ChingChen; LIU, Cheng Hsien; DU, Chen-Hsun; TSAUR, Jiunn jye; LEE, Chengkuo. 2001. A Large-Angle and Large-Mirror Microscanner Based on Thermal Actuators. In *Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. New York, NY: ASME, 2001. p. 1–6.

- URBACH, J. C.; FISLI, T. S.; STARKWEATHER, G. K. 1982. Laser Scanning for Electronic Printing. *Proceedings of IEEE*, 1982, vol. 70, p. 597–618.
- UREY, Hakan. 2002. Torsional MEMS Scanner Design for High-resolution Display Systems. In OPTICAL ENGINEERING, SPIE Society for (Ed.). *Optical Scanning II. Proceedings of SPIE*. [S.l.: s.n.], 2002. vol. 4773, p. 27–37.
- UREY, Hakan; KAN, Cihan; DAVIS, Wyatt O. 2005. Vibration mode frequency formulae for micromechanical scanners. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, vol. 15, no. 9, p. 1713. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0960-1317/15/1713>.
- VANGBO, Mattias; KARLSSON, Staffan; BÄCKLUND, Ylva. 1999. Low Cost Micromachined Mirrors for Display Systems. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1999, vol. 9, no. 1, p. 85–88.
- VEIJOLA, T.; KUISMA, H.; LAHDENPERA, J.; RYHANEN, T. 1995. Equivalent-circuit model of the squeezed gas film in a silicon accelerometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, maio 1995, vol. 48, no. 3, p. 239–248. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THG-3YVCYVK-N/2/3610804ecb4d8e60eace47ec6eed69ef>.
- VENGALLATORE, Srikar. 2005. Analysis of thermoelastic damping in laminated composite micromechanical beam resonators. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, vol. 15, no. 12, p. 2398–2404. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0960-1317/15/2398>.
- WADA, H. 2004a. Analysis of the Structure of Vertical Comdrive of Fast Scanning Micromirrors. *Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters & Express Letters*, 2004, vol. 43, no. 4B, p. L548–L550.
- WADA, H; LEE, D; ZAPPE, S; KRISHNAMOORTHY, U; SOLGAARD, O. 2004b. Bonding of Two Silicon Layers Above a Gap to Fabricate a Fast Scanning Micromirror. *Japanese Journal Of Applied Physics Part 2-Letters*, 2004, vol. 43, no. 1A-B, p. L50–L52.
- _____. 2004c. Snap Down Voltage of a Fast-Scanning Micromirror with Vertical Electrostatic Comdrives. *Japanese Journal Of Applied Physics Part 2-Letters*, 2004, vol. 43, no. 2B, p. L284–L286.
- WARD, Reeder N.; MONTGOMERY, Mark T.; GOTTLIEB, Milton. 2004. Handbook of optical and laser scanning. In _____. [S.l.]: Marcel Dekker, Inc, 2004. cap. 12, p. 599–663.
- WEBB, J. B. 1993. Edge Elements and what they can do for you. *IEEE Transactions on Magnetics*, March 1993, vol. 30, no. 2, p. 1460–1465.
- WEI, GH; BHUSHAN, B; JACOBS, SJ. 2004. Nanomechanical Characterization of Multilayered Thin Film Structures for Digital Micromirror Devices. *Ultramicroscopy*, 2004, vol. 100, no. 3-4, p. 375–389.
- WEN, J; HOA, XD; KIRK, AG; LOWTHER, DA. 2004. Analysis of the Performance of A MEMS Micromirror. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, vol. 40, no. 2, p. 1410–1413.

- WILLIAMS, Kirt R.; MULLER, Richard S. 1996. Etch Rates for Micromachining Processing. *Journal of Microelectromechanical Systems*, dez. 1996, vol. 5, no. 4, p. 256–269.
- WOODSON, Herbert H.; MELCHER, James R. 1968a. *Electromechanical Dynamics - Part I: Discrete Systems*. 1st. ed. New York: John Wiley and Sons, INC. BAE: 621.313W868ev1.
- _____. 1968b. *Electromechanical Dynamics - Part II: Fields, Forces and Motion*. 1st. ed. New York: John Wiley and Sons, INC. BAE: 621.313W868ev1.
- WU, M. C. 1997. Micromachining for Optical and Optoelectronic Systems. *Proceedings of IEEE*, 1997, vol. 85, no. 11, p. 1833–1856.
- YAN, J; KOWEL, ST; CHO, HJ; AHN, CH; NORDIN, GP; KULICK, JH. 2004. Autostereoscopic Three-Dimensional Display Based on a Micromirror Array. *APPLIED OPTICS*, 2004, vol. 43, no. 18, p. 3686–3696.
- YEOW, J.T.W.; YANG, V.X.D.; CHAHWAN, A.; GORDON, M.L.; QI, B.; VITKIN, I.A.; WILSON, B.C.; GOLDENBERG, A.A. 2005. Micromachined 2-D scanner for 3-D optical coherence tomography. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, vol. 117, no. 2, p. 331–340. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THG-4CYWP80-3/2/250bec6b0145255fd492efe3da6ccfc8>.
- YOO, Jae Gu; TESAR, Delbert. 2004. Torque Saturation Analysis in Electromechanical Motor. In *Proceedings of IMECE 2004*. [S.l.: s.n.], 2004.
- YOUNG, W. C.; BUDYNAS, R. G. 2002. *Roark's Formulas for Stress and Strain*. [S.l.]: MacGraw-Hill.
- ZELNY, Rolland. 2004. Scanning the Scene. *SPIE's OEmagazine*, May 2004, p. 30–32.
- ZHANG, XM; CHAU, FS; QUAN, C; LAM, YL; LIU, AQ. 2001. A Study of the Static Characteristics of a Torsional Micromirror. *Sensors And Actuators A-Physical*, 2001, vol. 90, no. 1-2, p. 73–81.
- ZHAO, J. P.; CHEN, H. L.; HUANG, H. M.; LIU, A. Q. 2005. A Study of Dynamic Characteristics and Simulation of MEMS Torsional Micromirrors. *Sensors And Actuators A-Physical*, 2005, vol. 120, no. 1, p. 199–210.
- ZHOU, GY; CHEO, KKL; TAY, FEH; CHAU, FS. 2004. Neural Network Approach for Linearization of the Electrostatically Actuated Double-Gimballed Micromirror. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2004, vol. 40, no. 2, p. 141–153.
- ZHOU, GY; TAY, FEH; CHAN, FS. 2003. Macro-Modeling of a Double-Gimballed Electrostatic Torsional Micromirror. *Journal Of Micromechanics And Microengineering*, 2003, vol. 13, no. 5, p. 532–547.
- ZIENKIEWICZ, O. C. 1977. *The Finite Element Method*. London: McGraw-Hill Company.

Apêndice A

Exemplos de programas APDL utilizados nas simulações

Neste apêndice serão apresentados os programas utilizados para simulação por elementos finitos estrutural e eletromagnética do atuador fracamente acoplado e do *scanner* com duplo rotor em Bronze-fosforoso.

A.1 Simulação eletromagnética - Atuador fracamente acoplado

Listagem A.1: Programa principal. actuator2D.inp

```
1 !#####
2 !# Macro that generates the stator geometry
3 !# Author: Luiz C. M. Oliveira
4 !# file:actuator2D.inp
5 !# Ansys version: Ansys70/Research
6 !#####
7 /NOPR ! Suppress printing of UNDO process
8 FINISH ! Make sure we are at BEGIN level
9 /CLEAR ! Clear model since no SAVE found
10 *ABBR,actuator2D,/input,actuator2D,inp
11 *ABBR,TRANS,/input,solve_trans,inp
12
13 create_geo ! Cria a geometria
14 set_elements ! Atribui os elementos à geometria
15 mesh_now ! Gera a malha
```

```

16 apply_loads      ! Aplica as cargas
17 solve_trans      ! Resolve o problema
18 pproc_trans      ! Trata e mostra os resultados

```

Listagem A.2: Programa para gerar a geometria do atuador. create-geo.mac

```

: finish
2 /PREP7
3
4 != Yoke dimensions [mm] =====
5 fscale=10e-3          ! Scale factor
6 a=47.5*fscale
7 b=38*fscale
8 c=10*fscale          !Permanent Magnet gap
9 d=23.5*fscale
10 e=12.98*fscale
11 h=17.33*fscale      !Lower Bridge arm
12 i=8.3*fscale        !Bridge "thickness"
13 k=18.2*fscale
14 m=1.6*fscale
15 r1=8*fscale
16 r2=1*fscale
17 r3=2*fscale
18 r4=0.5*fscale
19 o=1.65*fscale
20 p=0.76*fscale
21 q=2*fscale
22 r=18.2*fscale
23 !=====
24
25 != Yoke heigth - (Used in 3D analysis) =====
26 z0=0
27 z1=30*fscale
28 !=====
29
30 != Driving Coil Cross-section =====
31 gap=0.001*fscale

```

```

32 tcoil=3*fyscale           ! Coil thickness
33 hcoil=10*fyscale
34 jgap=0.01*fyscale        ! Gap for current application
35 Acoil=2*tcoil*hcoil
36 Nturns=300              ! number of turns
37 Fillfactor=0.039
38 LenghtZ = 30*fyscale
39 !=====
40
41 != Air Box =====
42 dair=tcoil
43 lair = 105*fyscale
44 hair = 192*fyscale
45 !=====
46
47 != Permanent Magnets Gap =====
48 magw = 10*fyscale
49 magh = c
50 !=====
51
52 != Rotor =====
53 wrotor = 5*fyscale
54 hrotor = 0.3*fyscale
55 !=====
56
57 != Armature =====
58 warm = 1*fyscale
59 harm = 0.1*fyscale
60 !=====
61
62 != Geometry generation =====
63 pi=4*atan(1)
64 THETA=42                 ![Deg]           ! 40<THETA<90
65
66 Trad=THETA*pi/180
67 deltax=i/tan(Trad)
68
69 !=====

```

```

70 N,1          ! Create Nodes For Circuit Elements
71 *REPEAT,8,1
72 !=====
73
74
75 != KeyPoints Generation =====
76 /PNUM,KP,1
77 k,1,0,0,z0
78 k,2,0,a,z0
79 k,3,r1,a,z0
80 k,4,r1,a+r1,z0
81 k,5,r1+b,a+r1,z0
82 k,6,r1+b+c/2,a+r1,z0
83
84 *GET,X5,KP,5,LOC,X
85 *GET,Y5,KP,5,LOC,Y
86 k,7,X5,Y5-d,z0
87
88 *GET,Y7,KP,7,LOC,Y
89 *GET,X7,KP,7,LOC,X
90
91 k,14,d+o,e+p,z0
92 k,15,d,e,z0
93 k,16,d,0,z0
94
95 *GET,Y14,KP,14,LOC,Y
96 *GET,X14,KP,14,LOC,X
97 *GET,X15,KP,15,LOC,X
98 *GET,Y15,KP,15,LOC,Y
99
100 k,80,X15,Y7,z0
101 l,15,80
102
103 CLOCAL,13,0,X14,Y14,0,90+THETA
104 k,13,-h+r4,0,z0
105 k,131,-h,-r4,z0
106 k,121,-h,-i+r4,z0
107 k,12,-h+r4,-i,z0

```

```

106
109 k,110,deltax+o+o*cos(Trad)/2+1,-i,z0
110 l,12,110
111
112 k,130,-h+r4,-r4,z0
113 k,120,-h+r4,-i+r4,z0
114 k,140,0,-i,z0
115
116 CSYS,0
117 lin1,1,2
118
119 k,15,d,e,z0
120
121 l,16,15
122 l,15,14
123 l,14,13
124 larc,13,131,130,r4
125 l,131,121
126 CLOCAL,13,0,X14,Y14,0,90+THETA
127 k,12,-h+r4,-i,z0
128 larc,121,12,120,r4
129 l,12,140
130 l,140,8
131
132 CSYS,0
133 *GET,X8,KP,8,LOC,X
134 *GET,Y8,KP,8,LOC,Y
135 k,10,X8,Y8+m,z0
136 l,8,10
137
138 k,88,X8+r3,Y7,z0
139
140 *GET,X88,KP,88,LOC,Y
141 k,9,X88,Y8,z0
142
143 larc,10,88,9,r3
144 l,88,7
145

```

```

146 L,1,2
147 LARC,2,4,3,r1
148 L,4,5
149 L,5,7
150 L,16,1
151 L,8,15
152
153 !Extra mesh keypoints
154
155 *GET,Y10,KP,10,LOC,Y
156
157 k,250,0,Y10,z0
158 L,250,10                                !Additional lines
159
160 *GET,Y4,KP,4,LOC,Y
161 *GET,X88,KP,88,LOC,X
162 k,230,X88,Y4,z0
163 L,230,88
164
165 *GET,Y15,KP,15,LOC,Y
166 k,150,0,Y15,z0
167 L,150,15
168
169 L,14,140
170
171 csys,0
172
173 *GET,X131,KP,131,LOC,X
174 *GET,X121,KP,121,LOC,X
175 *GET,X7,KP,7,LOC,X
176 *GET,X13,KP,13,LOC,X
177
178 *GET,Y121,KP,121,LOC,Y
179 *GET,Y140,KP,140,LOC,Y
180 *GET,Y12,KP,12,LOC,Y
181
182 k,132,X131,0,z0
183 k,122,X7+magw/2,Y121,z0

```

```

184 k,133 ,X7+magw/2 ,0 ,z0
185 k,123 ,X121,0 ,z0
186 k,130 ,X13,0 ,z0
187
188 l,131 ,132
189 l,132 ,123
190 l,123 ,121
191
192 k,141 ,X7+magw/2 ,Y140 ,z0
193 k,142 ,X121 ,Y140 ,z0
194 k,143 ,X7+magw/2 ,Y12 ,z0
195 l,140 ,142
196 l,142 ,12
197
198 ! Permanent Magnet region
199 *GET,X6,KP,6 ,LOC,X
200 *GET,Y6,KP,6 ,LOC,Y
201 k,148 ,X6,Y6-d ,z0
202
203 A,13 ,131 ,132 ,130
204
205 ! Driving Coils
206 *GET,X16,KP,16 ,LOC,X
207 RECTNG,X16+gap ,X16+gap+tcoil ,0 ,hcoil/2
208 RECTNG,-gap,-gap-tcoil ,0 ,hcoil/2
209
210 ! Extra mesh keypoints
211 *GET,X18,KP,18 ,LOC,X
212 k,181 ,X18+3*tcoil ,hcoil/2 ,0
213 l,18 ,181
214 lin1 ,37,3
215 l,14 ,24
216 l,24 ,13
217 l,18 ,24
218 lcomb ,37,3
219 ldele ,3
220 ldele ,37
221

```

```

222 *GET, X17, KP, 17, LOC, X
223 *GET, Y13, KP, 13, LOC, Y
224 k, 171, X17, Y13
225 l, 171, 13
226 l, 17, 130
227 l, 15, 18
228
229 ! ===== Interest region =====
230 kwpave, 133
231 csys, 4
232
233 !---- Rotor
234 k, 182, - wrotor / 2, 0
235 k, 183, wrotor / 2, hrotor
236 RECTNG, - wrotor / 2, 0, 0, hrotor
237 !-----
238
239 !---- Armature
240 *GET, Y28, KP, 28, LOC, Y
241 *GET, X28, KP, 28, LOC, X
242 *GET, X26, KP, 26, LOC, X
243 RECTNG, X28, X28+warm, Y28, Y28+harm
244 !-----
245
246 !---- Force Air
247 RECTNG, X28, X28+warm, Y28+harm, Y28+2*harm
248 !-----
249
250 !---- Between armature areas
251 RECTNG, X28+warm, 0, Y28, Y28+harm
252 RECTNG, X28+warm, 0, Y28+harm, Y28+2*harm
253 !-----
254
255 !---- Air box on the armature
256 RECTNG, X28, X26, Y28+2*harm, Y121
257 *GET, X123, KP, 123, LOC, X
258 *GET, X48, KP, 48, LOC, X
259 RECTNG, X123, X48, Y28+2*harm, Y121

```

```

260 RECTNG,X123 ,X48 ,0 ,Y28+2*harm
261 !-----
262 ! ===== END - Interest region =====
263
264 ! ===== Other Areas =====
265
266 !---- Ironcore
267 A,1,150,15,16
268 A,150,250,10,15
269 A,250,2,4,230,88,10
270 A,88,230,5,7
271 A,15,8,140,14
272 A,14,140,12,121,131,13
273 !-----
274
275 !---- Internal air
276 A,12,140,142
277 A,18,15,14,24
278 A,171,18,24,13
279 A,17,171,13,130
280 A,132,131,121,123
281 A,16,15,18,19,11
282 A,12,142,141,143
283 A,121,12,143,47
284 A,140,8,10,88,148,141
285 !-----
286
287 !---- Permanent magnet
288 A,7,5,6,148
289 !-----
290
291 kwpave,133
292 csys,4
293 allsel,all
294 ARSYMM,X,all
295
296
297 !----- Airbox generation -----

```

```

298
299 *GET, X20, KP, 20, LOC, X
300 *GET, X65, KP, 65, LOC, X
301 *GET, Y6, KP, 6, LOC, Y
302
303 k, 185, X20-dair, 0
304 k, 186, X20-dair, Y6+dair
305 k, 187, X65+dair, Y6+dair
306 K, 188, X65+dair, 0
307
308 A, 185, 186, 187, 188
309
310 allsel, all
311 aovlap, all
312 aplot
313
314 ! ----- Adjusting geometry to mesh -----
315 ! Rotor
316 ADELE, 75, 76
317 ldele, 42
318 lcomb, 193, 195
319 lcomb, 207, 209
320 A, 25, 28, 72, 69
321
322 ! internal coils
323 ADELE, 74
324 ADELE, 81
325 lcomb, 80, 82
326 A, 11, 19, 18, 17
327 A, 62, 63, 64, 61
328
329 !----Upper air
330 ADELE, 77
331 Adele, 82
332 lcomb, 51, 218
333 lcomb, 117, 220
334 A, 36, 48, 93, 80
335 ! ===== END - Other Areas =====

```

```

336
337 !===== Defining components =====
338 asel,s,,,2
339 cm,rotor , area
340
341 asel,s,,,58
342 asel,a,,,64
343 cm,armature , area
344
345 asel,s,,,58
346 cm,leftarm , area
347
348 asel,s,,,60
349 asel,a,,,66
350 cm,forceregion , area
351
352 asel,s,,,59
353 asel,a,,,65
354 asel,a,,,70,71
355 cm,barmsair , area
356
357 asel,s,,,3
358 asel,a,,,5
359 cm,coilin , area
360
361 asel,s,,,4
362 asel,a,,,30
363 cm,coilout , area
364
365 asel,s,,,12
366 asel,a,,,14,16
367 asel,a,,,39
368 asel,a,,,41,43
369 asel,a,,,72
370 asel,a,,,83
371 asel,a,,,86,87
372 cm,ironcore , area
373

```

374 asel, s, , , 1
375 asel, a, , , 18
376 asel, a, , , 21
377 asel, a, , , 23, 24
378 asel, a, , , 28
379 asel, a, , , 45
380 asel, a, , , 48
381 asel, a, , , 50
382 asel, a, , , 56, 57
383 asel, a, , , 62
384 asel, a, , , 68, 69
385 asel, a, , , 73
386 asel, a, , , 78, 80
387 asel, a, , , 88, 89
388 cm, intair , area
389
390 asel, s, , , 61
391 asel, a, , , 67
392 asel, a, , , 84
393 asel, a, , , 85
394 cm, nearair , area
395
396 asel, s, , , 60
397 asel, a, , , 66
398 cm, forceregion , area
399
400 asel, s, , , 58
401 asel, a, , , 64
402 cm, armature , area
403
404 asel, s, , , 59
405 asel, a, , , 65
406 asel, a, , , 70, 71
407 cm, barmsair , area
408
409 asel, s, , , 6
410 cm, uparmair , area
411

```
412 asel,s,,,27
413 asel,a,,,63
414 cm,magnet,area
415
416 asel,s,,,90
417 cm,extair,area
418
419 allsel
420 CMPL
421 finish
422 != CREATE_GEO.MAC - END =====
```

Listagem A.3: Programa atribuir as propriedades aos elementos. set-elements.mac

```

1 finish
2 /prep7
3
4 !-----!-----! DEFINITIONS -----!-----
5 !
6 !
7 !
8 !
9 !
10 !
11 !
12 !
13 !
14 !
15 !
16 !-----!-----!
17
18 !=====
19 !
20 !=====
21 /PNUM,MAT,1
22 /NUMBER,1
23
24 !----- Air
25 ET,1,PLANE13,0 !air
26 !AZ degrees of freedom: static domain, source domain
27 !ET,1,PLANE13,3
28 !UX,UY - DOFs
29
30 !----- Ironcore
31 ET,2,PLANE53,0 !ironcore
32 !AZ degrees of freedom: static domain, source domain
33
34 !---- Driving coils
35 ET,3,PLANE53,3
36 !Keyopt(1)=3,

```

```

37 !AZ,CURR,EMF      DOFs
38 !Circuit-coupled stranded coil
39
40 !--- Armature
41 ET,4,PLANE13,6
42 AZ,VOLT          ! armature 'DOFs
43
44 !--- Force air
45 ET,5,PLANE13,0
46
47 !--- Magnet
48 ET,6,PLANE53,0
49
50 !--- Circuit elements
51 ET,7,CIRCU124,0          ! External Resistor
52 ET,8,CIRCU124,4,1      ! Sinusoidal Source
53 ET,9,CIRCU124,5      ! Stranded Coil (To Fea Domain)
54
55 !=====
56 !                      Materials
57 !=====
58 emunit,mks          ! Definicao do sistema de unidades
59
60 MP,MURX,1,1
61 MP,MURX,2,1
62 MP,RSVX,2,0.1724e-7    ! Resistivity of coil
63 MP,RSVX,3,70e-8      ! Resistivity (nucleo)
64 MP,MURX,3,40e3
65 MP,MURX,4,1
66 MP,RSVX,4,0.1724e-7    ! Resistivity of coil
67
68 ! ----- NdFeB Magnets -----
69 ! From www.dexternag.com
70 ! NdFeB model - N4014
71 !
72 ! 1 Oe => 0.08kA/m
73 ! HC=11.8 kOe      =    944 kA/m      ! Coercivity
74 ! BR=12.8 kGauss   ! Residual induction

```

```

75
76 hc = 944e3
77 mu0 = 1.2566e-6
78 br = 1.28
79 mur = br/(mu0*hc)
80
81 MP,MURX,5,mur          ! Permanent Magnet Relative Permeability
82 MP,MGXX,5,hc          ! Coercive Force (X-Direction)
83
84 !=====
85 !                      Real constants
86 !=====
87 ! Used by the 53 in the modeling of the driving coils
88 R,2,Acoil,Nturns,LenghtZ, 1,Fillfactor
89 R,3,Acoil,Nturns,LenghtZ,-1,Fillfactor
90
91 finish

```

Listagem A.4: Programa para gerar a malha. mesh-now.mac

```
1 finish
2 /prep7
3
4 !AATT,MAT,REAL,ELEM
5
6 !----- ironcore
7 cmisel,s,ironcore
8 aatt,3,,2
9 !-----
10
11 !----- drivingcoils
12 cmisel,s,coilin
13 aatt,2,2,3
14 cmisel,s,coilout
15 aatt,2,3,3
16 !-----
17
18 !----- air
19 cmisel,s,extair
20 cmisel,a,barmsair
21 cmisel,a,uparmair
22 cmisel,a,forceregion
23 cmisel,a,intair
24 cmisel,a,nearair
25 aatt,1,,1
26 !-----
27
28 !----- armature
29 cmisel,s,armature
30 aatt,4,,4
31 !aatt,1,,1
32 !-----
33
34 !----- magnet
35 cmisel,s,magnet
36 aatt,5,,6
```

```

37 !aatt,1,,1
38 !-----
39
40 !----- rotor
41 cmisel,s,rotor
42 aatt,1,,1           ! Not considered yet.
43 !-----
44 allsel,all
45 /PNUM,MAT,1
46 aplot
47
48 !=====
49 !                               MESH
50 !=====
51
52 size1=0.05*fscale           ! Armature mesh size
53 size2=0.8*fscale           ! Interest air mesh size
54 size3=2*fscale             ! ironcore and the rest
55
56 !----- Air
57 mshmid,0
58 mshkey,1             !mapped mesh
59
60 esize,size1
61 cmisel,s,armature
62 cmisel,a,forceregion
63 cmisel,a,barmsair
64 amesh,all
65
66 esize,size2
67 asel,s,,,61
68 asel,a,,,67
69 amesh,all
70 !-----
71
72 !----- Iron Core -----
73 mshmid,0             ! 0 - midside nodes
74 mshkey,1           ! 0 - free mesh 1- mapped mesh

```

```

75 mshape,0                ! 0 - quadrilateral elements
76                          ! 1-triangular elements
77
78 esize,size3
79 cmsel,s,ironcore
80 asel,u,,,14
81 asel,u,,,17
82 asel,u,,,86,87
83 asel,u,,,41
84 asel,u,,,72
85 asel,u,,,83
86 amesh,all
87 !-----
88
89 !----- Magnet-----
90 cmsel,s,magnet
91 mshape,0
92 amesh,all
93 !-----
94
95 !----- Dcoils -----
96 esize,size2
97 cmsel,s,coilin
98 cmsel,a,coilout
99 amesh,all
100 !-----
101
102 !----- Rotor -----
103 esize,size2
104 cmsel,s,rotor
105 cmsel,a,uparmair
106 amesh,all
107 !-----
108
109 !----- Trick areas -----
110 esize,size2
111 mshkey,0
112 mshape,1

```

```

113 asel,s,,86,87
114 amesh,all
115
116 esize,size2*3
117 asel,s,,14
118 asel,a,,72
119 asel,a,,41
120 asel,a,,83
121 amesh,all
122
123 mshape,1
124 mshkey,1
125 lccat,68,221
126 lccat,134,231
127 asel,s,,73
128 asel,a,,80
129 amesh,all
130
131 esize,size1
132 mshape,1
133 lsel,s,,199
134 lsel,a,,194
135 lsel,a,,44
136 lccat,all
137 asel,s,,84
138 amesh,all
139
140 lsel,s,,212
141 lsel,a,,208
142 lsel,a,,110
143 lccat,all
144 asel,s,,85
145 amesh,all
146 allsel,all
147 !-----
148
149 !----- Air between the bridges -----
150 esize,size2

```

```

151 mshape, 1
152 mshkey, 1
153 asel, s, , , 1
154 asel, a, , , 21
155 asel, a, , , 28
156 asel, a, , , 48
157 asel, a, , , 56, 57
158 asel, a, , , 68, 69
159 amesh, all
160
161 mshape, 0
162 lccat, 63, 202
163 lccat, 215, 227
164 asel, s, , , 78, 79
165 asel, a, , , 24
166 asel, a, , , 62
167 amesh, all
168
169 mshkey, 0
170 mshape, 1
171 asel, s, , , 18
172 asel, a, , , 45
173 asel, a, , , 23
174 asel, a, , , 50
175 asel, a, , , 88, 89
176 amesh, all
177 !-----
178
179 !----- External air -----
180 esize, size3*2
181 mshape, 1
182 asel, s, , , 90
183 amesh, all
184 !-----
185 allsel, all
186 eplot
187 finish

```

Listagem A.5: Programa para aplicar as cargas. apply-loads .mac

```
1 finish
2 /prep7
3 !=====
4 !                               Loads
5 !=====
6 VSOURCE=60           ! Driving voltage
7 VFREQ = 80           ! [Hz]
8 !=====
9
10 !=====
11 !                               Boundary conditions
12 !=====
13
14 !**** Coupling dofs in the armature
15 !
16 cmsel,s,armature
17 nsla,,1
18 CP,9,VOLT,ALL           ! couple VOLT dof in coil
19 ALLSEL
20
21 !-----
22 ! EXTERNAL CIRCUIT
23 ! FOUR-WINDINGS IN SERIES
24
25 ASEL,s,,3
26 NSLA,,1
27 *GET,N1,NODE,,NUM,MIN
28
29 ASEL,s,,4
30 NSLA,,1
31 *GET,N2,NODE,,NUM,MIN
32
33 ASEL,s,,5
34 NSLA,,1
35 *GET,N3,NODE,,NUM,MIN
36
```

```

37 ASEL,s,,30
38 NSLA,,1
39 *GET,N4,NODE,,NUM,MIN
40 allsel,all
41
42 !-----
43 TYPE,8
44 R,5,0,VSOURCE,VFREQ,,,      ! Sinusoidal Input
45 REAL,5
46 E,2,1,7                      ! Voltage Source Element
47 !-----
48
49 !-----
50 TYPE,7
51 R,4,0.001
52 REAL,4
53 E,2,3                        !0.001 Ohms Resistor
54 !-----
55
56 !-----
57 TYPE,9
58 R,6,1
59 REAL,6
60 E,3,4,N1                    ! Stranded Coil Element
61
62 ASEL,s,,3
63 NSLA,,1
64 CP,1,CURR,ALL            ! Left 1
65 CP,2,EMF,ALL
66 allsel
67 !-----
68
69 !-----
70 TYPE,9
71 REAL,6
72 E,4,5,N2                    !Stranded Coil Element
73 ASEL,s,,4
74 NSLA,,1

```

```

75 CP,3,CURR,ALL                !LEFT 2
76 CP,4,EMF,ALL
77 allsel
78 !-----
79
80 !-----
81 TYPE,9
82 REAL,6
83 E,5,6,N3                      ! Stranded Coil Element
84 ASEL,s,,5
85 NSLA,,1
86 CP,5,CURR,ALL                ! Right 1
87 CP,6,EMF,ALL
88 allsel
89 !-----
90
91 !-----
92 TYPE,9
93 REAL,6
94 E,6,1,N4                      ! Stranded Coil Element
95 ASEL,s,,30
96 NSLA,,1
97 CP,7,CURR,ALL                ! Right 2
98 CP,8,EMF,ALL
99 allsel
100 !-----
101 NSEL,ALL
102 ESEL,ALL
103 FINISH
104
105 /SOLU
106 !-----
107 ! **** Apply Dirichlet boundary condition
108 ! At the flux parallel boundaries the edge-flux DOFS,
109 ! AZ, are set to zero
110
111 *GET,X186,KP,186,LOC,X
112 *GET,Y186,KP,186,LOC,Y

```

```
113 *GET,X188,KP,188,LOC,X
114 lsel,s,LOC,X,X186
115 lsel,a,LOC,X,X188
116 lsel,a,LOC,Y,Y186
117 NSLL,S,ALL
118 D,ALL,AZ,0
119 SF,ALL,inf           ! SET infinite surface flag
120 allsel,all
121 D,1,VOLT,0           ! Ground
122 allsel,all
123
124 FMAGBC, 'armature '
125
126 CIND=0.03292           ! From static analysis
127 CRES=1.98923
```

Listagem A.6: Programa para chamar o *solver* para uma análise do tipo transiente.
solve-trans.mac

```
1 finish
2 /SOLU
3 ANTYPE,TRANS
4 OUTRES,ALL,ALL           ! Store Every Substep
5 DELTIM,.0008
6 TIME,.1000
7 SOLVE
8 FINISH
```

Listagem A.7: Programa para obter e traçar os gráficos dos campos magnéticos.

pproc-trans.mac

```
1 /POST1
2 PATH,center,2,,1000
3 PPATH,1,,31,0,0
4 PPATH,2,,71,0,0
5 PDEF,center,B,SUM
6 PLPATH,center          ! Plot B_SUM on center path
7
8
9 /POST26
10 NSOL,2,N1,CURR          ! GET CURRENT IN COIL
11 NSOL,3,N1,VOLT          ! GET Voltage in coil
12 NSOL,4,59,VOLT          ! GET CURRENT IN armature
13 RES=CRES
14 I01=(12/RES)*(1-(EXP(-RES*.01/CIND)))
15 PRVAR,2
16 PLVAR,2
17 *GET,ICUR,VARI,2,RTIME,.01
18 /AXLAB,X,TIME
19 /AXLAB,Y,CURRENT IN COIL (AMPS)
20 /SHOW
21 PLVAR,2                ! PLOT COIL CURRENT VS TIME.
```

A.2 Simulação estrutural modal - *Scanner* de Bronze-fosforoso de 60 Hz

Listagem A.8: Programa principal. scannerBF.inp

```
1 !*****
2 ! Modelagem do scanner com um unico rotor
3 ! Anlise Modal Tridimensional
4 ! Scanner 2 barras / haste de 4.0 mm nominal
5 !*****
6 ! Author: Luiz Claudio Marangoni de Oliveira/FEM/UNICAMP.
7 ! $Revision: 0.1 $
8 ! $Date: Jan / 2004
9 !*****
10 /NOPR ! Suppress printing of UNDO process
11 FINISH ! Make sure we are at BEGIN level
12 /CLEAR ! Clear model since no SAVE found
13 *ABBR,GO,/input,drs_aco_modal,inp
14 *ABBR,MOVENOW,/INPUT,movenow,mac
15 /TITLE,Double-rotor Scanner Analysis
16
17 !Structure
18 geometry.mac
19
20 !Modal Analysis
21 modal.mac
```

Listagem A.9: geometry.mac

```
1 !*****
2 ! Modelagem do scanner com duplo rotor em ÇAO_SILICIO
3 ! á Anlise Modal Tridimensional
4 !*****
5 ! Author: Luiz Claudio Marangoni de Oliveira
6 ! DMC/FEM/UNICAMP.
7 ! $Revision:1.1 $
8 ! $Date: 14/04/04 10:38
9 !*****
10 /NOPR ! Suppress printing of UNDO process
11 /FINISH ! Make sure we are at BEGIN level
12
13 ! Pre Process
14 /prep7
15 /VIEW, 1, 0.486142137538 , -0.552865848779 , 0.676760796267
16 /ANG, 1, -56.5120636903
17
18 !=====
19 ! Propriedades dos Materiais
20 ! Bronze-fosforoso - Liga 521
21 !=====
22 !-----
23 ! Modulo de Elasticidade
24 !-----
25 E=110e9 ! [Pa]
26 !-----
27 ! Densidade
28 !-----
29 dens=8800 ! [Kg/m^3] !
30 !-----
31 ! Constante de Poisson
32 !-----
33 ni=.341 !
34 !-----
35 ! Espessura da chapa
36 alt=0.50e-3 ! [m]
```

```

37 !=====
38
39 !=====
40 !çãAtribuio as propriedades
41 !=====
42 MP,EX,1,E
43 MP,NUXY,1,ni
44 MP,DENS,1,dens
45
46 MP,EX,2,E
47 MP,NUXY,2,ni
48 MP,DENS,2,dens
49 !=====
50 ! çãDefinio dos Elementos
51 !=====
52 ET,1,SOLID92
53 ET,2,SOLID92
54 !=====
55 ! õDimenses e modelo éGeomtrico.
56 !=====
57 ! Angulo de ataque
58 pi=4*atan(i)
59 !=====
60 !           Dimensoes do dispositivo (em m)
61 !=====
62 r=0.8e-3           !raio de curvatura da mola
63 wm=0.3e-3         !largura da mola
64 li=2e-3           !comprimento inicial
65 lc=6.0e-3         !comprimento braco do S
66
67 !Comprimento das barras
68 lbarra2=5e-3
69
70 !Largura das barras
71 Wbarra2=5e-3
72
73 LTOTAL=2*li+3*wm+4*(r-wm/2)
74 wbar = 1.1e-3

```

```

75
76 !-----
77 !           Espelho/Armadura
78 !-----
79 !Espelho
80 el1=20e-3
81 ew1=20e-3
82
83 !armadura
84 ew2=11e-3
85 el2=14e-3
86
87 !-----
88 !           Angulo de ataque
89 !-----
90 theta=90           !em graus
91 theta=theta*pi/180 !em radianos
92 !-----
93 !Comprimentos calculados a partir das dimensoes iniciais e angulo de ataque
94 !Origem
95 X0=0
96 Y0=0
97 Z0=0
98
99 Zi=alt
100 delta=0           ! perpendicular profile
101 l1a = X0-li
102 w1a = Y0+wm
103 w2a = Y0+wbarra2
104 l1b = X0-delta
105 w1b = Y0-delta
106 ! Variaveis auxiliares
107 wblaux=wm/2
108 varaux = ew2/2-wblaux
109 !-----
110
111 !-----
112 !Componentes do eixo maior

```

```

113 xmcomp=1
114 ymcomp=0
115 zmcomp=0
116 major=6.5e-3
117
118 !Componentes do eixo menor
119 xncomp=0
120 yncomp=1
121 zncomp=0
122 minor=13e-3
123
124 !Centro do espelho
125 xx0=X0+minor/2
126 yy0=Y0+wblaux
127 !-----
128
129 l2a=minor+X0
130 ehwl = (ewl-wm)/2
131 ehw2 = (ew2-wbarra2)/2
132 deltabar12=0
133
134 !=====
135 !           Geracao do modelo
136 !=====
137 k,1007,lla+delta-wm-2*r+wm,wla+delta ,Z1
138 k,1004,lla-2*r+wm,wla,Z0
139 k,1006,lla-wm-2*r+wm,wla,Z0
140 k,1005,lla+delta-2*r+wm,wla+delta ,Z1
141
142 k,1017,lla-4*r+2*wm+delta ,wla+delta-wm,Z1
143 k,1019,lla-4*r+wm-delta ,wla+delta-wm,Z1
144 k,1018,lla-4*r+wm,wla-wm ,Z0
145 k,1016,lla-4*r+2*wm,wla-wm, Z0
146 !*****
147 !elemento 1
148 !*****
149 k,100,X0,Y0,Z0
150 k,101,lla ,Y0,Z0

```

```

151 K,102,11a,w1a,Z0
152 k,103,X0,w1a,Z0
153 k,104,11b,w1b,Z1
154 k,105,11a+delta,w1b,Z1
155 k,106,11a+delta,w1a+delta,Z1
156 k,107,11b,delta+w1a,Z1
157 v,100,101,102,103,104,105,106,107
158 !*****
159 !elemento 100
160 !*****
161 k,1000,11a-wm,w1a,Z0
162 k,1001,11a-wm,w1a-wm,Z0
163 k,1002,11a+delta-wm,w1b,Z1
164 k,1003,11a+delta-wm,w1a+delta,Z1
165 v,106,105,1002,1003,102,101,1001,1000
166 !*****
167 !elemento 111
168 !*****
169 k,3000,11a-wm,w1a+lc,Z0
170 k,3002,11a,w1a+lc,Z0
171 k,3006,11a+delta,w1a+delta+lc,Z1
172 k,3003,11a+delta-wm,w1a+delta+lc,Z1
173 v,1000,102,106,1003,3000,3002,3006,3003
174 !*****
175 !elemento 112
176 !*****
177 k,3007,11a+delta-wm-2*r+wm,w1a+delta+lc,Z1
178 k,3004,11a-2*r+wm,w1a+lc,Z0
179 k,3016,11a-wm-2*r+wm,w1a+lc,Z0
180 k,3005,11a+delta-2*r+wm,w1a+delta+lc,Z1
181 v,1006,1004,1005,1007,3016,3004,3005,3007
182 !*****
183 !elemento 101
184 !*****
185 k,1012,11a-wm-r+wm/2,r+wm/2+lc,Z0
186 k,1013,11a-wm-r+wm/2,r-wm/2+lc,Z0
187 k,1014,11a-wm-r+wm/2,r-wm/2-delta+lc,Z1
188 k,1015,11a-wm-r+wm/2,r+wm/2+delta+lc,Z1

```

```

189 LARC,3004,3000,1013
190 LARC,3016,3002,1012
191 LARC,3005,3003,1014
192 LARC,3007,3006,1015
193 A,3004,3016,3007,3005
194 A,3016,3004,3000,3002
195 A,3007,3005,3003,3006
196 A,3003,3000,3004,3005
197 A,3007,3016,3002,3006
198 asel,s,,16
199 asel,a,,22
200 asel,a,,24,27
201 va,all
202 allsel
203 !*****
204 !elemento 102
205 !*****
206 k,1008,11a-wm-2*r+wm      ,wla-wm ,Z0
207 k,1010,11a-2*r+wm      ,wla-wm, Z0
208 k,1009,11a+delta -wm-2*r+wm  ,wla+delta -wm  ,Z1
209 k,1011,11a+delta -2*r+wm      ,wla+delta -wm  ,Z1
210 v,1005,1011,1009,1007,1004,1010,1008,1006
211 !*****
212 !elemento 113
213 !*****
214 k,3008,11a-wm-2*r+wm      ,wla-wm-lc ,Z0
215 k,3010,11a-2*r+wm      ,wla-wm-lc , Z0
216 k,3009,11a+delta -wm-2*r+wm  ,wla+delta -wm-lc  ,Z1
217 k,3011,11a+delta -2*r+wm      ,wla+delta -wm-lc  ,Z1
218 v,1008,1010,1011,1009,3008,3010,3011,3009
219 !*****
220 !elemento 114
221 !*****
222 k,3017,11a-4*r+2*wm+delta ,wla+delta -wm-lc ,Z1
223 k,3019,11a-4*r+wm-delta ,wla+delta -wm-lc ,Z1
224 k,3018,11a-4*r+wm,wla-wm-lc  ,Z0
225 k,3026,11a-4*r+2*wm,wla-wm-lc , Z0
226 v,1018,1016,1017,1019,3018,3026,3017,3019

```

```

227 !*****
228 !elemento 103
229 !*****
230 k,1020,11a-4*r+wm+r+wm/2, wla-wm-r-wm/2+2*wm-lc ,Z0
231 k,1021,11a-4*r+wm+r+wm/2, wla-wm-r-wm/2+wm-lc ,Z0
232 k,1022,11a-4*r+wm+r+wm/2, wla-wm-r-wm/2+wm-delta-lc ,Z1
233 k,1023,11a-4*r+wm+r+wm/2, wla-wm-r-wm/2+2*wm+delta-lc ,Z1
234 LARC,3018,3010,1021
235 LARC,3026,3008,1020
236 LARC,3017,3009,1023
237 LARC,3019,3011,1022
238 A,3017,3019,3011,3009
239 A,3026,3018,3010,3008
240 A,3008,3009,3017,3026
241 A,3019,3018,3010,3011
242 asel,s,, ,37
243 asel,a,, ,43,47
244 VA,all
245 !*****
246 !elemento 104
247 !*****
248 k,1024,11a-4*r+2*wm,wla,Z0
249 k,1026,11a-4*r+wm,wla,Z0
250 k,1025,11a-4*r+2*wm+delta,wla+delta,Z1
251 k,1027,11a-4*r+wm-delta,wla+delta,Z1
252 v,1017,1025,1027,1019,1016,1024,1026,1018
253 !*****
254 !elemento 105
255 !*****
256 k,1028,11a-4*r+wm-li,wla,Z0
257 k,1030,11a-4*r+wm-li,wla-wm,Z0
258 k,1029,11a-4*r+wm-3*delta-li,wla+delta,Z1
259 k,1031,11a-4*r+wm-3*delta-li,wla+delta-wm,Z1
260 v,1027,1029,1031,1019,1026,1028,1030,1018
261 !-----
262 !Espelho oval
263 !-----
264 ! Coordenadas cilindricas

```

```

265 ! Desenha a elipse
266 zz0=Z0
267 /INPUT,'ellipse3 ','mac'
268
269 zz0=Z1
270 /INPUT,'ellipse3 ','mac'
271
272 !Cria 1/4 do espelho
273 v,1,2,3,4,5,6
274 VSEL,S,LOC,Y,0,90
275 CSYS,4
276 vsymm,x,all
277 vsymm,y,all
278 CSYS,0
279 !*****
280 !elemento 5
281 !Barra de âconexo
282 !*****
283 k,500,12a+lbarra2, ,Y0, ,Z0
284 k,503,12a+lbarra2, ,w1a, ,Z0
285 k,504,12a+lbarra2-delta, ,Y0-delta, ,Z1
286 k,507,12a+lbarra2-delta, ,w1a+delta, ,Z1
287 k,2000,12a, ,Y0-deltabar12, ,Z0
288 k,2040,12a+delta, ,w1b-deltabar12, ,Z1
289 k,2070,12a+delta, ,w1a+delta+deltabar12, ,Z1
290 k,2030,12a, ,w1a+deltabar12, ,Z0
291 k,5000,12a+lbarra2, ,Y0-deltabar12, ,Z0
292 k,5030,12a+lbarra2, ,w1a+deltabar12, ,Z0
293 k,5040,12a+lbarra2-delta, ,Y0-delta-deltabar12, ,Z1
294 k,5070,12a+lbarra2-delta, ,w1a+delta+deltabar12, ,Z1
295 v,5040,2040,2070,5070,5000,2000,2030,5030
296 !*****
297 !elemento 9
298 !*****
299 k,6000,12a+lbarra2+e12, ,Y0, ,Z0
300 k,6040,12a+lbarra2+e12+delta, ,Y0+delta, ,Z1
301 k,6070,12a+lbarra2+e12+delta, ,delta+w1a, ,Z1
302 k,6030,12a+lbarra2+e12, ,w1a, ,Z0

```

```

303 k,903 ,12a+lbarra2+el2+li ,wla ,Z0
304 k,907 ,12a+lbarra2+el2+li-delta ,delta+wla ,Z1
305 k,900 ,12a+lbarra2+el2+li ,Y0 ,Z0
306 k,904 ,12a+lbarra2+el2+li-delta ,Y0-delta ,Z1
307 v,904,6040,6070,907,900,6000,6030,903
308 !*****
309 !elemento 200
310 !*****
311 k,200 ,12a+lbarra2+el2+li+wm ,Y0 ,Z0,
312 k,202 ,12a+lbarra2+el2+li+wm ,wla ,Z0
313 k,201 ,12a+lbarra2+el2+li+wm+delta ,Y0-delta ,Z1
314 k,203 ,12a+lbarra2+el2+li+wm+delta ,delta+wla ,Z1
315 v,201,203,907,904,200,202,903,900
316 !*****
317 !elemento 210
318 !*****
319 k,8003 ,12a+lbarra2+el2+li ,wla+lc ,Z0
320 k,8007 ,12a+lbarra2+el2+li-delta ,delta+wla+lc ,Z1
321 k,4002 ,12a+lbarra2+el2+li+wm ,wla+lc ,Z0
322 k,4003 ,12a+lbarra2+el2+li+wm+delta ,delta+wla+lc ,Z1
323 v,903,907,203,202,8003,8007,4003,4002
324 !*****
325 !elemento 202
326 !*****
327 k,212 ,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*_r-2*wm ,wla-wm ,Z0
328 k,213 ,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*_r-2*wm ,wla-wm-delta ,Z1
329 k,214 ,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*_r-wm ,wla-wm ,Z0
330 k,215 ,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*_r-wm+delta ,wla-wm-delta ,Z1
331 k,208 ,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*_r-wm ,wla ,Z0
332 k,209 ,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*_r-wm+delta ,delta+wla ,Z1
333 k,210 ,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*_r-2*wm ,wla ,Z0
334 k,211 ,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*_r-2*wm-delta ,delta+wla ,Z1
335 v,212,214,215,213,210,208,209,211
336 !*****
337 !elemento 211
338 !*****
339 k,3208 ,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*_r-wm ,wla+lc ,Z0
340 k,3209 ,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*_r-wm+delta ,delta+wla+lc ,Z1

```

```

341 k,3210,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*r-2*wm ,wla+lc ,Z0
342 k,3211,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*r-2*wm-delta ,delta+wla+lc ,Z1
343 v,210,211,209,208,3210,3211,3209,3208
344 !*****
345 !elemento 212
346 !*****
347 k,3212,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*r-2*wm ,wla-wm-lc ,Z0
348 k,3213,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*r-2*wm ,wla-wm-delta-lc ,Z1
349 k,3214,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*r-wm ,wla-wm-lc ,Z0
350 k,3215,12a+lbarra2+el2+li+wm+2*r-wm+delta ,wla-wm-delta-lc ,Z1
351 v,212,213,215,214,3212,3213,3215,3214
352 !*****
353 !elemento 204
354 !*****
355 k,224,12a+lbarra2+el2+li+wm+4*r-2*wm ,wla ,Z0
356 k,226,12a+lbarra2+el2+li+wm+4*r-3*wm ,wla ,Z0
357 k,223,12a+lbarra2+el2+li+wm+4*r-2*wm+delta ,wla+delta ,Z1
358 k,225,12a+lbarra2+el2+li+wm+4*r-3*wm-delta ,wla+delta ,Z1
359 k,217,12a+lbarra2+el2+li+wm+4*r-2*wm+delta ,wla-wm+delta ,Z1
360 k,219,12a+lbarra2+el2+li+wm+4*r-3*wm-delta ,wla-wm+delta ,Z1
361 k,216,12a+lbarra2+el2+li+wm+4*r-3*wm ,wla-wm ,Z0
362 k,218,12a+lbarra2+el2+li+wm+4*r-2*wm ,wla-wm ,Z0
363 v,216,218,217,219,226,224,223,225
364 !*****
365 !elemento 213
366 !*****
367 k,3217,12a+lbarra2+el2+li+wm+4*r-2*wm+delta ,wla-wm+delta-lc ,Z1
368 k,3219,12a+lbarra2+el2+li+wm+4*r-3*wm-delta ,wla-wm+delta-lc ,Z1
369 k,3216,12a+lbarra2+el2+li+wm+4*r-3*wm ,wla-wm-lc ,Z0
370 k,3218,12a+lbarra2+el2+li+wm+4*r-2*wm ,wla-wm-lc ,Z0
371 v,216,218,217,219,3216,3218,3217,3219
372 !*****
373 !elemento 205
374 !*****
375 k,228,12a+lbarra2+el2+2*li+wm+4*r-2*wm ,wla-wm , Z0
376 k,230,12a+lbarra2+el2+2*li+wm+4*r-2*wm ,wla , Z0
377 k,227,12a+lbarra2+el2+2*li-wm+4*r+delta ,wla+delta , Z1
378 k,229,12a+lbarra2+el2+2*li-wm+4*r+delta ,wla-wm+delta , Z1

```

```

379 v,227,229,217,223,230,228,218,224
380 !*****
381 !elemento 201
382 !*****
383 k,204,12a+lbarra2+e12+li+wm+r-2*wm/2 , w1a+r-wm/2+lc , Z0
384 k,205,12a+lbarra2+e12+li+wm+r-2*wm/2 , w1a+r-3*wm/2-delta+lc , Z1
385 k,206,12a+lbarra2+e12+li+wm+r-2*wm/2 , w1a+r-3*wm/2+lc , Z0
386 k,207,12a+lbarra2+e12+li+wm+r-2*wm/2 , w1a+r-wm/2+delta+lc , Z1
387 LARC,8003,3208,204
388 LARC,4002,3210,206
389 LARC,4003,3211,205
390 LARC,8007,3209,207
391 A,3208,3210,4002,8003
392 A,3211,3209,8007,4003
393 A,4002,4003,3211,3210
394 A,3208,3209,8007,8003
395 asel,s,,99
396 asel,a,,110
397 asel,a,,132,135
398 VA,all
399 !*****
400 !elemento 203
401 !*****
402 k,3222,12a+lbarra2+e12+li+3*r-2*wm/2 , -r+3*wm/2-lc , Z0
403 k,3220,12a+lbarra2+e12+li+3*r-2*wm/2 , -r+wm/2-lc , Z0
404 k,3223,12a+lbarra2+e12+li+3*r-2*wm/2 , -r+3*wm/2+delta-lc , Z1
405 k,3221,12a+lbarra2+e12+li+3*r-2*wm/2 , -r+wm/2-delta-lc , Z1
406 LARC,3214,3216,3222
407 LARC,3212,3218,3220
408 LARC,3215,3219,3223
409 LARC,3213,3217,3221
410 A,3214,3215,3219,3216
411 A,3218,3217,3213,3212
412 A,3214,3212,3218,3216
413 A,3217,3219,3215,3213
414 asel,s,,115
415 asel,a,,126
416 asel,a,,136,139

```

```

417 VA, all
418 allsel
419 !*****
420 !elemento 7 - Rotor
421 !*****
422 k,700,12a+lbarra2+e12      ,Y0-varaux      ,Z0
423 k,704,12a+lbarra2+e12+delta ,Y0-varaux-delta ,Z1
424 k,701,12a+lbarra2          ,Y0-varaux      ,Z0
425 k,705,12a+lbarra2-delta    ,Y0-varaux-delta ,Z1
426 k,802,12a+lbarra2          ,varaux+wm      ,Z0
427 k,803,12a+lbarra2+e12      ,varaux+wm      ,Z0
428 k,806,12a+lbarra2-delta    ,varaux+delta+wm ,Z1
429 k,807,12a+lbarra2+e12+delta ,varaux+delta+wm ,Z1
430 V,704,6040,5040,705,700,6000,5000,701
431 V,6040,6070,5070,5040,6000,6030,5030,5000
432 V,6070,807,806,5070,6030,803,802,5030
433 !*****
434 !Perfuracao no rotor
435 !*****
436 KWPAVE,701
437 CSYS,4
438 k,5001,wbar,wbar
439 KWPAVE,5001
440 CSYS,4
441 k,5002,e12-wbar-wbar,0,z0
442 k,5003,e12-wbar-wbar,ew2-wbar-wbar,z0
443 k,5004,0,ew2-wbar-wbar,z0
444 k,5005,e12-wbar-wbar,0,z1
445 k,5006,e12-wbar-wbar,ew2-wbar-wbar,z1
446 k,5007,0,ew2-wbar-wbar,z1
447 k,5008,0,0,z1
448 v,5001,5002,5003,5004,5008,5005,5006,5007
449 vsel,s,,28,31
450 VSBV,all,31
451 allsel
452 vplot
453 vsel,s,,12,15
454 vadd,all

```

```

455 !*****
456 vsel,s,, ,1
457 vsel,a,, ,16
458 vsel,a,, ,28
459 vovlap,all
460
461 !===== çãNomeao das partes =====
462 vsel,s,, ,1,11
463 CM, firstbar ,VOLU
464
465 cmsel,s, firstbar
466 vsel,s,, ,17,27
467 CM, thirdbar ,VOLU
468
469 vsel,s,, ,12
470 CM, firstbarlg ,VOLU
471
472 vsel,s,, ,13
473 CM, midbar ,VOLU
474
475 vsel,s,, ,14
476 CM, mirror ,VOLU
477
478 vsel,s,, ,32,35
479 CM, rotor ,VOLU
480 !===== MESH =====
481 /prep7
482
483 msize1=0.45e-3
484 esize,msize1
485 cmsel,s, firstbar
486 cmsel,a, thirdbar
487 vmesh,all
488 vsel,s,, ,29,31
489 VATT,1,, ,1,0
490 MSHAPE,1,3D
491 MSHKEY,0
492 vmesh,all

```

```
493
494 esize, msize1
495 vsel, s, , 32, 33
496 vmesh, all
497
498 cmsel, s, rotor
499 vmesh, all
500 !===== MESH END =====
```

Listagem A.10: ellipse3.mac

```
1 ratio=minor/major
2 /prep7
3 csys,0
4 wplane,,xx0,yy0,zz0,xx0+xmcomp*major
5                               ,yy0+ymcomp*major,zz0+zmcomp*major,xx0+xncomp*minor
6                               ,yy0+yncomp*minor,zz0+zncomp*minor
7 cswpla,11,1,ratio,1
8
9 k,,0,0,zz0
10 k,,major,0,zz0
11 k,,major,90,zz0
12 l,kp(major,0,zz0),kp(major,90,zz0)
13
14 l,kp(major,0,zz0),kp(0,0,zz0)
15 l,kp(major,90,zz0),kp(0,0,zz0)
```

Listagem A.11: modal.mac

```
1 !=====
2 ! Modal Analysis
3 !=====
4 /SOLU
5 ANTYPE,MODAL
6 MODOPT,SUBSP,5
7 EXPAND,5,,0
8 MODOPT,SUBSP,5,0,0,,OFF
9 RIGID,
10 SUBOPT,8,4,9,0,5,ALL
11 MXPAND,0,,,YES
12 EQSLV,pcg
13
14 KSEL,S,,227,230
15 KSEL,A,,1028,1031
16 !*
```

```
17 /GO
18 DK, ALL, ,0, ,0, ALL, , , , ,
19 SAVE
20 SOLVE
21 FINISH
22
23 /POST1
24 SET, LIST
```

Índice Remissivo

- Ímãs permanentes, 38
 - Produto de energia, 38
 - Temperatura de Curie, 38
- Ângulo de deflexão óptica, 12
- Jitter*, 9
- Low Inertia Scanners*, 7
- Não-linearidades*, 9
- Scanners*
 - Aplicações, 5
 - Subsistemas, 4
 - Concepção do dispositivo, 21
 - Definição, 3
 - Tipos de *scanners*, 5
 - Atuados por indução, 21
 - Galvanométricos, 7
 - Oscilantes, 6
 - Piezoelétricos, 7
 - Planares, 11
 - Refletivos, 6
 - Ressonantes, 8, 11
 - Tamanho da ordem de mm, 11
- Scanners Ressonantes*
 - Parâmetros de desempenho, 12
 - Ângulo de deflexão óptica, 12
 - Fator de qualidade, 12
 - Frequência de varredura, 12
 - Mecanismo de atuação, 12
 - Processo de fabricação, 12
- Scanners indutivos*
 - Concepção, 21
- Wooble*, 9
- Atuador fortemente acoplado, 40
- Atuador fracamente acoplado, 39
- Bamboleio, 9
- Bronze-fosforoso, 49
 - Comparação propriedades mecânicas, 50
 - Composição, 49
- Coefficiente de ressonância não torsional, 66
- Coefficiente de ressonância torsional, 63
- Coefficientes
 - Ressonância não torsional, 66
 - Ressonância torsional, 63
- Corrente induzida na armadura, 38
- Deriva mecânica, 9
- Duplo-rotor, 42
- Equações de Maxwell, 22
 - Equação de Ampère-Maxwell, 23
 - Equação de Faraday, 23
 - Relações constitutivas, 23
- Fator de qualidade, 12, 79
- Força de Lorentz, 29
- Fotofabricação, 48
- Fotografação
 - Características técnicas, 49
 - Vantagens, 48
- Frequência de varredura, 12
- G, 62
- Galvos, 7
- Indutância
 - Definição, 24
 - Fluxo concatenado, 26
 - Indutância mútua, 27
 - Teoria de circuitos, 27

Jacques d'Arsonval, 7

Lentes $F - \theta$, 6

Lentes de campo planares, 6

Linha de varredura, 4

Erros, 9

Deriva mecânica, 9

Jitter ou tremulação, 9

Não-linearidades, 9

Wooble ou bamboleio, 9

Formas de onda, 7

Módulo de elasticidade, 62

Materiais estruturais

Aço, 50

Bronze-fosforoso, 50

Si, 50

Mecanismo de atuação, 12

Modo Horizontal Translacional, 66

Modo Rotacional Ortogonal, 69

Modo Rotacional Transversal, 67

Modo Torsional, 62

Modo Vertical Translacional, 64

Modos de vibração

Horizontal Translacional, 66

Rotacional Ortogonal, 69

Rotacional Transversal, 67

Torsional, 62

Vertical Translacional, 64

Momento de inércia, 74

Oscilador harmônico torsional

Equação do movimento

Termo Estacionário, 32

Termo Transiente, 32

Ressonância, 31

Pixel, 9

Princípio de d'Arsonval, 7

Princípio do galvanômetro, 7

Processo de fabricação, 12

Processo SI-LIG, 16

Q, 79

Resolução óptica, 7

Scanner com duplo rotor

Modelo dinâmico, 80

Scanner com Duplo-rotor, 42

Sistemas de varredura

Sistemas de Escrita, 5

Sistemas de Leitura, 5

Tensão induzida

Tensão de transformação, 26

Tensão de velocidade, 26

Tensão na armadura, 28, 38

Tensão no estator, 28

Tremulação, 9

Usinagem foto-química, 48

Vibrometria Laser Doppler, 136