

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MICROELETRÔNICA

MANUEL MARTÍN PÉREZ REIMBOLD

**Otimização da Síntese do Projeto de Atuadores MEMS Baseados em
Deformação Elástica e Estrutura *Comb-drive***

Tese apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Doutor em
Microeletrônica

Prof. Dr. Renato Perez Ribas
Orientador

Porto Alegre, dezembro de 2008

CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Reibold, Manuel Martín Pérez

Otimização da Síntese do Projeto de Atuadores MEMS Baseados em Deformação Elástica e Estrutura *Comb-drive* / Manuel Martín Pérez Reibold – Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Microeletrônica, 2008.

119 p.: il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Microeletrônica. Porto Alegre, BR – RS. 2008. Orientador: Renato Perez Ribas.

1 • MEMS. 2 • *Comb-drive*. 3 • Projeto. 4 • Síntese. 5 • Identificação de Sistemas. 6 • Modelo ARX. I. Ribas, Renato Perez. II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. Aldo Bolten Lucion

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Flávio Rech Wagner

Coordenador do PGMICRO: Prof. Ricardo Reis

Bibliotecária - Chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

A minha esposa *Enoy*, aos meus filhos, *Manuel e Paula*; admiráveis na sua essência, pois são estímulos que me impulsionam a procurar, constantemente, a superação pessoal, por isso dedico-lhes este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Renato Perez Ribas por exercer o buril criterioso e incessante, ao longo destes anos, e forjar-me como um pesquisador profissional. Que Deus abençoe nossa eterna amizade.

Aos professores Gideon Vilar Leandro e Wang Chong pela co-orientação, dedicação, motivação e confiança, que nos conduziram ao ponto a partir do qual continuaremos a desenvolver este fantástico trabalho de investigação.

Ao professor Henri Budinov pelo apoio e comentários dispensados, que me permitiram uma nova ótica na engenharia.

À secretaria do Programa de Pós-Graduação em Microeletrônica, com especial apreço a Sra. Zíngara Leal Teixeira Lubaszewski que de forma mui amiga sempre me alentou a continuar este trabalho.

À professora Vania Bogorny e ao companheiro Wander Jacomé Queiroz, não apenas somente pela constante atenção e disposição prestadas quando solicitadas, mas também pelo conforto amigo nas dificuldades da vida acadêmica.

Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida.

Aos professores do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI, em especial aos professores Eliseu Kotlinski e Robinson Figueiredo de Camargo pela amizade e apoio concedidos.

Aos meus pais porto-alegrenses, Sr. Roberto Lemos Iranço e Sra. Eliane Ricardo Iranço, que me acolheram como um filho na sua casa e me brindaram com seu amor e compreensão incondicional.

Aos meus pais, a minha mãe por tolerar meu incessante e eterno desejo de estudar, e a meu pai que sempre me ensinou a valorizar o conhecimento. Os bons resultados da minha vida justificam sua breve existência. Descanse em paz meu querido velho.

A meu irmão e amigo Oscar Oswaldo Vásquez Dubón porque sempre está presente na minha alegria espiritual desfrutando o riso.

Aos meus templários, Don Toño e Sr. Jacinto Vieira, que ainda aguardam o regozijo de nosso eterno encontro.

E finalmente, a minha esposa, pessoa fervorosa, que alenta as aventuras na minha vida, e principalmente neste trabalho. E aos meus filhos, que abriram mão do conforto e de nosso convívio em função da minha realização intelectual.

Se minha Teoria da Relatividade estiver correta, a Alemanha dirá que sou alemão e a França me declarará um cidadão do mundo. Mas, se não estiver, a França dirá que sou alemão e os alemães dirão que sou judeu.

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	8
LISTA DE SÍMBOLOS	10
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS	14
RESUMO	15
ABSTRACT	16
1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	17
1.2 MICROSSISTEMAS ELETROMECÂNICOS (MEMS)	18
1.2.1 Evolução dos MEMS.....	20
1.2.2 Aplicações	21
1.2.3 Mercado	23
1.2.4 Projeto Auxiliado por Computador	24
1.2.5 MEMS <i>versus</i> Microeletrônica.....	25
1.3 MOTIVAÇÃO.....	25
1.4 OBJETIVO	27
1.5 ESTRUTURAÇÃO	27
2 FUNDAMENTOS DE ATUADORES MEMS.....	29
2.1 PROPRIEDADES DA MATÉRIA	29
2.2 TRANSDUÇÃO OU CONVERSÃO DE ENERGIA.....	30
2.2.1 Dinâmica e Cinemática.....	31
2.2.2 Movimento Elástico.....	32
2.3 ATUADOR ELETROMECÂNICO	33
2.3.1 Atuadores Eletromecânicos Disponíveis	34
2.3.2 Atuador Elasticamente Deformável e Estrutura <i>Comb-Drive</i>	34
2.3.3 MEES - Microestruturas Elásticas Suspensas	35
2.3.4 Estrutura <i>Comb-drive</i>	36
2.4 PROJETO DE MEMS	38
2.4.1 Modelagem Matemática	40
2.4.2 Simulação e Verificação	41
2.5 PRODUÇÃO	43
2.5.1 Fabricação.....	43
2.5.2 Testes	44
2.5.3 Características Técnicas de Atuadores	46
3 SÍNTESE NO PROJETO DE ATUADORES MEMS.....	47
3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA EM NÍVEL DE SUBSISTEMA.....	47

3.1.1 Modelos Matemáticos.....	48
3.1.2 Modelos Dinâmicos.....	48
3.1.3 Propriedades dos Modelos.....	49
3.2 MODELO LINEAR EM TEMPO CONTÍNUO E DISCRETO.....	49
3.3 MODELAGEM ESTOCÁSTICA.....	51
3.3.1 Estimadores de Parâmetros de Modelos Discretos.....	53
3.3.2 Estimador Recursivo dos Mínimos Quadrados (RLS <i>Recursive Least Square</i>)	54
3.3.3 Estimador Recursivo Variável Instrumental (RIV <i>Recursive Instrumental Variable</i>)	55
3.4 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS.....	57
3.5 SISTEMAS EMERGENTES E INTELIGENTES.....	58
3.6 OTIMIZAÇÃO DA SÍNTESE DE MEMS.....	59
3.7 PROPOSTA: IDENTIFICAÇÃO “CAIXA CINZA PARA MEMS.....	62
4 METOLOGIA E RESULTADOS.....	64
4.1 METODOLOGIA.....	64
4.2 SELEÇÃO DE TESTES DINÂMICOS E COLETA DE DADOS.....	66
4.2.1 Plataforma de Teste.....	66
4.2.2 Sinais de Excitação.....	68
4.2.3 Tempo de Amostragem.....	68
4.3 DETERMINAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA.....	68
4.4 ELEIÇÃO DA ORDEM DO MODELO.....	69
4.5 ESCOLHA DO ESTIMADOR DE PARÂMETROS.....	70
4.6 VALIDAÇÃO DO MODELO - RESULTADOS.....	71
4.6.1 Validação da síntese do projeto de elasto-massas.....	76
4.6.2 Validação da síntese do projeto de atuadores eletrostáticos.....	80
5 CONCLUSÕES.....	85
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
5.2 RESULTADOS.....	86
5.3 PROPOSTAS PARA CONTINUAÇÃO DO TRABALHO.....	87
REFERÊNCIAS.....	88
APÊNDICES.....	97
APÊNDICE A – TOPOLOGIAS E DIMENSÕES DAS ELASTO-MASSAS.....	98
APÊNDICE B – PROGRAMAS PARA CÁLCULO DE M, D E K.....	100
APÊNDICE C – PLATAFORMA DE TESTE: ELASTO-MASSAS SEM / COM RUÍDO (ANSYS).....	103
APÊNDICE D – PLATAFORMA DE TESTE: ATUADOR SEM / COM RUÍDO (ANSYS).....	109
APÊNDICE E – PROGRAMA MATLAB: ESTIMADORES RLS E RIV.....	116

LISTA DE ABREVIATURAS

ADC	Conversor Analógico Digital (<i>Analog Digital Converter</i>)
AMP-OP	Amplificador Operacional (<i>Operational Amplifier</i>)
AR	Auto Regressivo (<i>Autoregressive</i>)
ARARX	Ruído Auto Regressivo em modelo Auto Regressivo de Entradas Exógenas (<i>Autoregressive Noise Autoregressive with Exogenous inputs</i>)
ARMA	Auto Regressivo de Média Móvel (<i>Autoregressive Moving Average</i>)
ARMAX	Auto Regressivo de Média Móvel com Entradas Exógenas (<i>Autoregressive Moving Average with Exogenous inputs</i>)
ARARMAX	Ruído Auto Regressivo em modelo Auto Regressivo de Entradas Exógenas (<i>Autoregressive Noise Autoregressive Moving Average with Exogenous inputs</i>)
ARPA	Agência de Projetos de Pesquisa Avançada (<i>Advanced Research Projects Agency</i>)
ARX	Auto Regressivo com Entradas Exógenas (<i>Autoregressive with exogenous inputs</i>)
BEM	Método de Elementos de Fronteira (<i>Boundary Elements Method</i>)
BIO-MEMS	Sistemas Biológicos Eletromecânicos (<i>Biological Micro-Electro-Mechanical Systems</i>)
CAD	Projeto Auxiliado por Computador (<i>Computer Aided Design</i>)
CAE	Engenharia Auxiliada por Computador (<i>Computer Aided Engineering</i>)
CAEMEMS	Engenharia de MEMS auxiliada por Computador (<i>Computer-Aided Engineering of MEMS</i>)
CAGR	Taxa de Crescimento Anual Composta (<i>Compound Annual Growth Rate</i>)
CI	Circuito Integrado (<i>Integrated Circuit</i>)
DAC	Conversor Digital Analógico (<i>Digital Analog Converter</i>)
DMD	Microespelho digital (<i>Digital Micromirror Device</i>)
DNA	Ácido desoxirribonucléico (<i>Deoxyribonucleic acid</i>)
DSP	Processador de Sinais Digitais (<i>Digital Signal Processor</i>)
DOF	Grau de liberdade (<i>Degree of Freedom</i>)
EFAB	Processo de microusinagem em superfície (<i>Surface Micromachining Process</i>)
EMQ	Erro Médio Quadrático (<i>Mean Square Error</i>)

f/V	Conversão Frequência - Voltagem (<i>Frequency to Voltage</i>)
FDM	Método de Diferenças Finitas (<i>Finite Differentials Method</i>)
FEM	Método de Elementos Finitos (<i>Finite Element Method</i>)
FIR	Resposta ao Impulso Finito (<i>Finite Impulse Response</i>)
GA	Algoritmos Genéticos (<i>Genetic Algorithm</i>)
IA	Inteligência Artificial (<i>Artificial Intelligence</i>)
LIGA	Litografia, Mistura e Conformância (<i>Lithography, Planting and Moulding</i>)
LoC	Laboratórios em um chip (<i>Lab on a Chip</i>)
LTI	Linear e Invariante no tempo (<i>Linear Invariant Time</i>)
MCNC	Centro de Microeletrônica de Carolina do Norte (<i>Micro-Electronic Center of North Carolina</i>)
MEMS	Sistemas Microeletromecânicos (<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>)
MPG	Micro Geração de Potência (<i>Micro Power Generation</i>)
MOEMS	Sistemas Micro-optoeletromecânicos (<i>Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems</i>)
MST	Tecnologia de Microssistemas (<i>Micro-Systems Technologies</i>)
MUMPS	Processo de MEMS para multiusuário (<i>Multi-User MEMS Process</i>)
NEXUS	Rede de Excelência em Microssistemas Multifuncionais (<i>Network of Excellence in Multifunctional Microsystems</i>)
ODEs	Equações Diferenciais Ordinárias (<i>Ordinary Differential Equations</i>)
PDEs	Equações Diferenciais Parciais (<i>Partial Differential Equations</i>)
PDL	Projeto Digital de Luz (<i>Projector Digital Light</i>)
PMN	Dispositivo Piezelétrico de Magnésio Niobate (<i>Piezoelectric Magnesium Niobate</i>)
PRBS	Seqüência Binária Pseudo-Randômica (Pseudo-Random Binary Sequence)
PZT	Dispositivo Piezelétrico de Zirconate (<i>Piezoelectric Zirconate Titanate</i>)
RIV	Variável Instrumental Recursiva (Recursive Instrumental Variable)
RF	Radio Frequência (<i>Radio Frequency</i>)
RLS	Mínimos Quadrados Recursivo (<i>Recursive Least Square</i>)
SCREAM	Processo de Corrosão e Metalização num Único Cristal (<i>Simple Single Crystal Reactive Etching and Metallization Process</i>)
SoC	Sistemas em um Chip (<i>System on Chip</i>)
TCAD	Tecnologias de Projeto Auxiliado por computador (<i>Technologies CAD</i>)
μ P	Microprocessador (<i>Micro-Processor</i>)
μ TAS	Microssistema de Análises Total (<i>Micro Total Analysis Systems</i>)
VCO	Oscilador controlado por tensão (<i>Voltage-Controlled Oscillators</i>)
V/f	Conversão Voltagem - Frequência (<i>Conversion Voltage to Frequency</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição
ρ	Densidade específica
ξ	Permissividade elétrica do meio
ε	Deformação específica
$v(k)$	Sinal de ruído
φ^T	Vetor de regressores
θ	Vetor de parâmetros
η_e	Atraso do sinal de ruído
η_u	Atraso do sinal de excitação
η_y	Atraso da resposta
ΔV	Diferença de potencial elétrico
Δi	Intervalo de tempo
μ	Massa específica
A	Área total da superfície do dispositivo
$A(q)$	Polinômio arbitrário
A_C	Área das colunas
A_p	Área das placas do capacitor
A_S	Área do corpo da massa oscilante
A_V	Área das vigas
$B(q)$	Polinômio arbitrário
C	Capacitância
C_1, C_2	Constantes a serem determinadas pelas condições de contorno.
d	Distância entre as placas de um capacitor
d_0	Distância inicial entre as placas do capacitor
d_r	Distância radial
D	Coefficiente de amortecimento
E	Modulo de Young
e	Espessura dos dispositivos
$F_e(t)$	Força eletrostática
$e(i)$	Seqüência de variáveis aleatórias

F_l	Força eletrostática longitudinal
F_t	Força eletrostática lateral
f_d	Frequência amortecida
$f(i)$	Sinal de entrada
f_o	Frequência de oscilação do sinal de excitação
f_r	Frequência de ressonância
$G(i)$	Função de transferência do sistema
$g(k)$	Resposta ao impulso
h	Distância entre duas superfícies
$H(q)$	Função de transferência do ruído
i	Instante de tempo
K_i	Matriz de ganho
k	Rigidez
L	Comprimento da coluna
l_m	Comprimento da massa de “vai e vem”
l_v	Comprimento da viga
M	Massa
P	Força aplicada na direção da coluna
P_i	Matriz de covariância
Q	Carga elétrica
q	Operador de deslocamento unitário
q^{-i}	Atraso unitário
R	Resistência elétrica
h_c	Altura das placas do capacitor
U	Energia eletrostática
$u(i)$	Sinal de excitação discretizado
V	Diferença de potencial
V_b	Potencial elétrico no ponto b
V_f	Potencial elétrico no ponto f
V_1, V_2, V_3	Potenciais elétricos
w_m	Largura da massa de “vai e vem”
w_v	Largura da viga
$X(i)$	Deslocamento estocástico
$x(t)$	Deslocamento determinístico
Z_i	Vetor de variáveis instrumentais
3D	Três dimensões
3P	Preço, peso, <i>performance</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Escala dimensional dos sistemas.	19
Figura 1.2: Esquema conceitual e funcional de um microssistema.	19
Figura 1.3: Ilustração tridimensional de um MEMS.	20
Figura 1.4: Tecnologias envolvidas e aplicações típicas de MEMS.	21
Figura 1.5: Aplicações MOEMS: (a) arranjo de microespelhos, (b) espelho digital (DMD – <i>Digital Mirror Device</i>) usado em sistemas digitais de projeção... ..	22
Figura 1.6: Bio-MEMS: (a) endoscopia, (b) cauterizador vascular, (c) cardio-MEMS. ..	22
Figura 1.7: Telecomunicações: (a) ressonadores, (b) indutor suspenso.	22
Figura 1.8: PG-MEMS: (a) dispositivo físico, (b) representação.	23
Figura 1.9: Mercado e utilização de MEMS: (a) demanda em MUS\$, (b) uso de MEMS em 2002, (c) uso de MEMS em 2007.	24
Figura 2.1: Fluxo de energia e estímulo/resposta do sensor transdutor.	31
Figura 2.2: Transdutores: (a) gerador; (b) atuador.	31
Figura 2.3: Curva Tensão vs. Deformação.	33
Figura 2.4: Atuador eletromecânico em diagrama de blocos.	33
Figura 2.5: Atuador MEMS elasto-deformável e ação eletrostática.	35
Figura 2.6: Viga engastada e em balanço, ou <i>microcantilever</i>	35
Figura 2.7: Topologias de elasto-massas: (a) forma U, (b) <i>crab</i> , (c) ponte dupla, (d) dobradiça dupla, (e) ponte simples, (f) serpentina.	36
Figura 2.8: Capacitor: (a) placas planas e dielétrico, (b) mobilidade de ambos.	36
Figura 2.9: Diferentes topologias de dedos capacitivos: (a) reto, (b) grosso-oval, (c) copa fina, (d) copa grossa, (e) alfinete, (f) serra.	37
Figura 2.10: Deslocamento dos dedos: (a) capacitor longitudinal, (b) forças eletrostáticas laterais, (c) capacitor lateral, (d) forças eletrostáticas longitudinais.	37
Figura 2.11: Tipos de <i>comb-drive</i> : (a) translação, (b) rotação.	38
Figura 2.12: Tipos de <i>comb-drive</i> de translação: (a) longitudinal, (b) lateral, (c) vertical.	38
Figura 2.13: Etapas da metodologia de projeto.	39
Figura 2.14: Modelagem matemática: nível de sistema.	40
Figura 2.15: Modelagem compacta de MEMS.	42
Figura 2.16: Tipos de microusinagem para fabricação de MEMS.	43
Figura 2.17: Custo <i>versus</i> rendimento dos testes para MEMS.	45
Figura 3.1: Concepção do modelo analítico de atuadores eletrostáticos MEMS.	50
Figura 3.2: Atuador eletrostático MEMS (a) parâmetros concentrados, (b) corpo livre.	50
Figura 3.3: Processo de identificação de sistemas.	58
Figura 3.4: Identificação “caixa cinza” para a síntese do projeto de MEMS.	63
Figura 4.1: Massas-elásticas: (a) pontes simples, (b) ponte dupla, (c) dobradiça dupla. ..	65
Figura 4.2: Atuadores eletrostáticos teste utilizados na síntese de projeto.	65

Figura 4.3: Circuito de parâmetros concentrados de atuadores eletrostáticos.....	65
Figura 4.4: Geometria do elemento SOLID45.	66
Figura 4.5: TRANS126: (a) banco capacitivo, (b) símbolo, (c) equivalente mecânico.	67
Figura 4.6: Características do TRANS126: (a) capacitância <i>versus</i> deslocamento, (b) repulsão eletro-mecânica.....	67
Figura 4.7: Representação esquemática do modelo ARX.	69
Figura 4.8: Análise da elasto-massa ponte simples. MATLAB®: (a) Freqüência, (b) Harmônica, (c) Transitória. ANSYS®: (d) Estática, (e) Harmônica, (f) Transitória.....	73
Figura 4.9: Análise da elasto-massa ponte dupla. MATLAB®: (a) Freqüência, (b) Harmônica, (c) Transitória. ANSYS®: (d) Estática, (e) Harmônica, (f) Transitória.....	74
Figura 4.10: Análise da elasto-massa dobradiça dupla. (a) Freqüência, (b) Harmônica, (c) Transitória. ANSYS®: (d) Estática, (e) Harmônica, (f) Transitória.....	75
Figura 4.11: Erro Relativo sem ruído. ANSYS® <i>versus</i> RLS: (a) ponte simples, (b) ponte dupla, (c) dobradiça dupla. ANSYS® <i>versus</i> RIV: (d) ponte simples, (e) ponte dupla, (f) dobradiça dupla.	77
Figura 4.12: Erro Relativo com ruído. ANSYS® <i>versus</i> RLS: (a) ponte simples, (b) ponte dupla, (c) dobradiça dupla. ANSYS® <i>versus</i> RIV: (d) ponte simples, (e) ponte dupla, (f) dobradiça dupla.	78
Figura 4.13: Erro relativo sem ruído do atuador. ANSYS® <i>versus</i> RLS: (a) ponte simples, (b) ponte dupla, (c) dobradiça dupla. ANSYS® <i>versus</i> RIV: (d) ponte simples, (e) ponte dupla, (f) dobradiça dupla.....	81
Figura 4.14: Erro relativo com ruído dos atuadores. ANSYS® <i>versus</i> RLS: (a) ponte simples, (b) ponte dupla, (c) dobradiça dupla. ANSYS® <i>versus</i> RIV: (d) ponte simples, (e) ponte dupla, (f) dobradiça dupla.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Modelos discretos utilizados em identificação de sistemas.....	53
Tabela 4.1: Ordem de excitação de alguns sinais conhecidos.....	68
Tabela 4.2: Algoritmo do estimador recursivo mínimos quadrados.	70
Tabela 4.3: Algoritmo do estimador recursivo variável instrumental.	71
Tabela 4.4: Parâmetros das elasto-massas, modelo analítico (MATLAB®).	72
Tabela 4.5: Parâmetros das elasto-massas obtidos a partir do ANSYS®.	72
Tabela 4.6: ANSYS® vs. ARX e estimador RLS (elasto-massa sem ruído).....	76
Tabela 4.7: ANSYS® vs. ARX e estimador RIV (elasto-massa sem ruído).....	76
Tabela 4.8: ANSYS® vs. ARX e estimador RLS (elasto-massa com ruído).....	76
Tabela 4.9: ANSYS® vs. ARX e estimador RIV (elasto-massa com ruído).....	76
Tabela 4.10: Tempos de execução dos estimadores RLS e RIV (elasto-massa sem ruído).....	79
Tabela 4.11: Tempos de execução dos estimadores RLS e RIV (elasto-massa com ruído).....	79
Tabela 4.12: ANSYS® versus ARX e estimador RLS (atuador sem ruído).....	80
Tabela 4.13: ANSYS® versus ARX e estimador RIV (atuador sem ruído).	80
Tabela 4.14: ANSYS® versus ARX e estimador RLS (atuador com ruído).	80
Tabela 4.15: ANSYS® versus. ARX e estimador RIV (atuador com ruído).....	80
Tabela 4.16: Tempos de execução dos estimadores RLS e RIV (atuador sem ruído). ..	83
Tabela 4.17: Tempos de execução dos estimadores RLS e RIV (atuador com ruído)...	83

RESUMO

MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) é um microsistema invasivo, intermediador e interativo que se desenvolve de forma inteligente, versátil e eficiente. Entretanto, a interatividade, característica que o torna altamente atrativo e suas qualidades de leveza, invisibilidade, economia quanto a consumo de energia, robustez e alta confiabilidade são foco de investigação. Através da obtenção dos parâmetros característicos muitos desses aspectos podem ser otimizados. Conseqüentemente, este trabalho se propõe obter os parâmetros característicos necessários ao modelo matemático de atuadores MEMS, baseados em deformação elástica e dinâmica *comb-drive*, de forma a descrever com precisão o comportamento linear destes em nível de sistema. Os parâmetros característicos de MEMS podem ser extraídos no próprio simulador, ou identificados através da manipulação dos dados dos sinais de entrada e saída obtidos na execução de testes modais sobre o protótipo. Quando a identificação é determinística, utiliza sinais de excitação que obedecem a uma boa relação sinal-ruído (*SNR-Signal-Noise Rate*). Quando a identificação é estocástica utiliza sinais de excitação misturados com ruído. Essas duas formas de identificação podem ser interpretadas como os dois extremos de identificação. A rigor, qualquer procedimento que não esteja em nenhum desses extremos pode ser denominado de identificação “caixa-cinza”. Dessa forma, a proposta deste trabalho investigativo consiste em utilizar a identificação “caixa cinza” para obter os parâmetros característicos dos atuadores eletromecânicos MEMS combinando as vantagens dos procedimentos determinísticos e estocásticos. Sob este propósito, foi feita revisão das propriedades da matéria, conceituação de atuadores, compreensão da visão *bottom-up* e, finalmente, estudo de modelos estocásticos com entradas exógenas ARX (*Autoregressive with Exogenous Inputs*) e uso de estimadores recursivos, Mínimos Quadrado e Variável Instrumental. A comparação dos resultados do modelo determinístico produzido através de FEM/BEM permite testar o desempenho entre dois modelos de índoles diferentes. Os resultados obtidos após a coleta de dados, a escolha da representação matemática, a determinação da estrutura do modelo, a estimação dos parâmetros e a validação do modelo das três tipologias de atuadores desenvolvidos: pontes simples, ponte dupla e dobradiça dupla permitem identificar os parâmetros característicos com erro quadrático médio menor a 1% e validar esses parâmetros num período não maior a 0,5s. Os resultados se mostram altamente satisfatórios, tornando este trabalho uma contribuição científica à síntese de MEMS em nível de sistemas.

Palavras chave: MEMS; *Comb-drive*, Projeto, Síntese, Identificação de Sistemas, Modelo ARX.

Optimization Design Synthesis of MEMS Actuators Based on Elastic Deformation and Comb-drive Structure

ABSTRACT

MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) is an invasive, intermedial and interactive small size system that develops in an intelligent, versatile and efficient way. However, the interactivity, feature that makes the system highly attractive and its qualities of lightness, invisibility, economy with regard to power consumption, robustness and high reliability are the focus of research. By obtaining the characteristic parameters many of these aspects can be optimized. Therefore, this study proposes to obtain the characteristic parameters necessary for the mathematical model for MEMS actuators, based on elastic deformation and dynamic comb-drive in order to accurately describe the linear behavior in level system. The characteristic parameters of MEMS can be extracted in the own simulator or identified through the manipulation of input and output data signals obtained in the execution of modal tests on the prototype. When the identification is deterministic, it uses the excitation signals that follow a good signal noise rate (SNR). When the identification is stochastic it uses excitation signals mixed with noise. These two forms of identification can be interpreted as the two extremes of the identification. Strictly speaking, any procedure that is not in any of these extremes may be called the "gray-box" identification. Thus, the propose of this research work consists of using the "gray-box" identification to obtain the characteristic parameters of the MEMS electro-mechanical actuators combining the advantages of the deterministic and stochastic procedures. Under this purpose, it was made revision of the matter features, conceptualization of the actuators, comprehension of the bottom-up vision and, finally, study of the stochastic models with autoregressive exogenous inputs (ARX) and the use of recursive estimators, Least Square and Instrumental Variable. The comparison of results of the deterministic model generated by FEM / BEM, allows testing the performance between two models of different kinds. The results obtained after the data collection, the choice of mathematical representation, the determination of the structure of the model, the estimation of the parameters and validation of the model of three actuators topologies developed (simple bridges, double bridge and double hinge) that permit to identify the parameters with a average quadratic error minor than 1% and to validate these parameters in a period not more than 0.5s. The results show highly satisfactory, becoming this work a scientific contribution to MEMS synthesis at system levels.

Key-words: MEMS, Comb-drive, Design, Synthesis, Systems Identification, ARX Model.

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o conceito necessário à compreensão dos dispositivos MEMS, assim como sua evolução nos últimos 60 anos. Posteriormente apresentam-se exemplos de aplicação dos mesmos nos campos da ótica, fluídica, medicina e telecomunicações. Também são apresentados os resultados otimistas do mercado em crescimento com projeções futuras. O projeto de MEMS auxiliado por computador e sua afinidade com a microeletrônica destacam-se como fatores relevantes. Para finalizar o capítulo apresenta-se a motivação para a realização deste trabalho investigativo e o objetivo a ser alcançado.

“Nada tão estúpido como vencer, a verdadeira glória está em convencer.”
Vitor Hugo (1802-1885).

1.1 Considerações Gerais

O homem, no decorrer da existência, testemunha que mudança e bens de consumo são essenciais para sua sobrevivência e evolução, pois tudo se move, transforma e renova. A mudança fortalece o processo de inovar. A velocidade das inovações e as profundas transformações têm demonstrado a constante evolução da sociedade. Tanto as inovações quanto as transformações têm atingido caráter natural e irreversível perante a coletividade. Entretanto, a evolução individual é premente, e, para que esta aconteça, os bens de consumo e os meios necessários devem obedecer à nova ordem, a qual implica satisfazer o binômio “exclusivo e amigável” imposto pela própria sociedade e o trinômio 3P “preço, peso e *performance* (desempenho)”, impetrados pela indústria.

A solução à demanda dessas características veio, em parte, através da miniaturização e da integração dos bens de consumo. Fato que se consolidou com o advento da Microeletrônica que, ao mesmo tempo, atribuiu aos bens de consumo as características de portabilidade e preço acessível que, alicerçados no potencial de processamento de um *chip* como resultado de um conjunto de transistores construídos num único circuito integrado (CI), fizeram e fazem a diferença na evolução do ser humano e determinam a qualidade de vida através de modernos bens de consumo nunca antes imaginados (BRINKMAN, 1997), (KILBY, 2000), (KURZWEIL, 1999).

Hoje, o homem está mais rápido e dinâmico, pois se aliou à tecnologia. A qualidade de bens de consumo obedece a uma relação sólida de equidade entre economia, homem e natureza. O homem, mentor de evolução, revê constantemente a capacidade inventiva, preservando as linhas do progresso da humanidade, e cuidando

para que a tecnologia não entre em conflito com os recursos naturais existentes. Porém, a evolução humana é mais rápida que a regeneração dos recursos naturais explorados (BECK, 2005). Todavia, a evolução humana, coletiva e individual, não depende unicamente de bens de consumo e insumos. Também é afetada por fatores como: 1) produção, estocagem e conversão de energia; 2) elevada produtividade na agricultura; 3) tratamento e melhoria da qualidade da água; 4) diagnóstico de doenças; 5) sistemas de administração de remédios; 6) processamento e estocagem de alimentos; 7) atmosfera salubre; 8) construção de moradia; 9) monitoramento da saúde; e 10) detecção e controle de vetores de doenças (MARTINS, 2006).

A solução a todos esses problemas tem sido permanente desafio ao homem. A investigação científica mostrou que “imitar e controlar a natureza no que ela criou de mais fantástico, o movimento da vida”, poderia ajudar a solucionar vários deles (BRETON, 1991). O átomo, sinônimo de “indivisível”, é a resposta à filosofia grega existente há 2.500 anos. O foco dos pensadores gregos era reduzir o mundo a componentes mais simples. O que remete a refletir sobre o sucesso da junção P-N da Microeletrônica. Entretanto, a solução ao transcendente questionamento dos gregos veio à tona, novamente, e se consolidou na percepção do Dr. Richard Phillips Feynman em 1959. Prêmio Nobel de Física, Feynman, em palestra proferida no Instituto de Tecnologia de Califórnia, sugeriu manipular átomos através de pequenas máquinas, porém sem violar as leis naturais. A proposta de Feynman quanto a utilizar novos materiais com novas propriedades e novos processos de fabricação para novas invenções, não somente se atinha em produzir novos materiais num futuro, mas procurava resolver todos os problemas, anteriormente citados (FEYNMAN, 1993).

A proposta de Feynman reafirma o pensamento grego perante a sociedade moderna: “muitas das soluções aos atuais problemas encontram-se na compreensão do mundo invisível ou microcosmos”, e ainda, com os resultados obtidos, boa parte da humanidade as vê de forma inviável. Pensar em alterar a rotação do elétron ou a camada de valência, retirando todos os elétrons e estimulando a instabilidade do átomo, não parece algo impossível após as idéias de Richard Feynman e Eric Drexler (BRYZEK, 1996). É uma questão de tempo e de visão. Conseqüentemente, Micro e Nano tecnologias são duas visões de mundo diferentes, sendo a primeira uma visão de imersão (*top-down*), e a segunda uma visão de emersão (*bottom-up*). É evidente que a ansiedade em estabelecer comunicação direta entre macro e nano cosmo, ou vice-versa, poderá instaurar um desequilíbrio drástico, mas retornar o equilíbrio e manipular corretamente os átomos é a missão do intermediador que Feynman propôs e que posteriormente foi chamado de “MEMS” (FEYNMAN, 1992).

Entretanto, a reflexão sobre porque Feynman se inspirou num intermediador, e também, o enxergou como sendo “simplesmente” uma máquina, evidencia que não se referia unicamente a subsistemas ou dispositivos e sim a um todo. A segunda proposta de Feynman intui a imitar o mais completo MEMS integrado à natureza “o Homem”. O qual é energia elétrica manifestando-se através de movimentos versáteis comandados pelo processamento inteligente de dados (SENTURIA, 1994).

1.2 Microssistemas Eletromecânicos (MEMS)

A consolidação da miniaturização, ao longo destes anos, permitiu aperfeiçoar sistemas em benefício do próprio homem. Conforme os processos de fabricação evoluíram, a escala dimensional colocou os microssistemas num limiar inferior a 100µm conforme mostra a Figura 1.1.

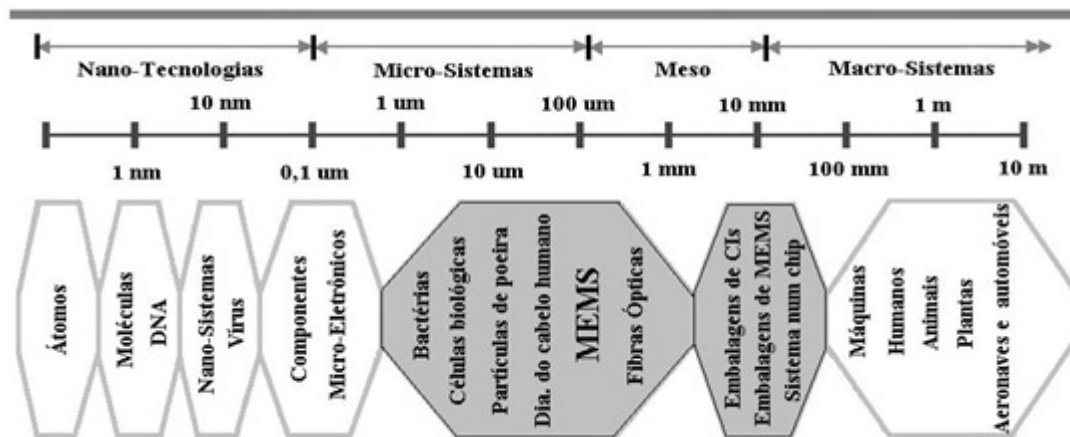


Figura 1.1: Escala dimensional dos sistemas (MADOU, 1997).

Para identificar os microssistemas, vários termos têm sido incorporados à linguagem técnica. O termo “micromáquinas” é muito usado na Ásia como sinônimo de “microssistemas”. Nos Estados Unidos a sigla MEMS permanece como termo dominante ao referenciar qualquer sistema de tamanho reduzido. O termo MOEMS (*Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems*) também é encontrado quando se trata de microssistemas ópticos. Entretanto, os cientistas europeus preferem uma definição mais técnica (estudo de processos), atribuindo-lhe a sigla MST (*Micro-Systems Technologies*) ou Tecnologias para Micro-Sistemas (FLUITMAN, 1996), (PLAZA, 2004).

O MEMS é um microssistema de princípio invasivo com capacidade de intermediação e interação que resulta da combinação das capacidades de sensação, atuação, autonomia, transporte e adaptação ao meio, determinadas através de processamento computacional, condicionamento de sinal, transferência de dados. Estes gerenciados por algoritmos matemáticos que imitam o pensamento humano tornam o comportamento dos MEMS inteligente, versátil e eficiente. O conceito funcional do MEMS é representado pelo diagrama em blocos da Figura 1.2 (FUJITA, 1996), (LANG, 1999).

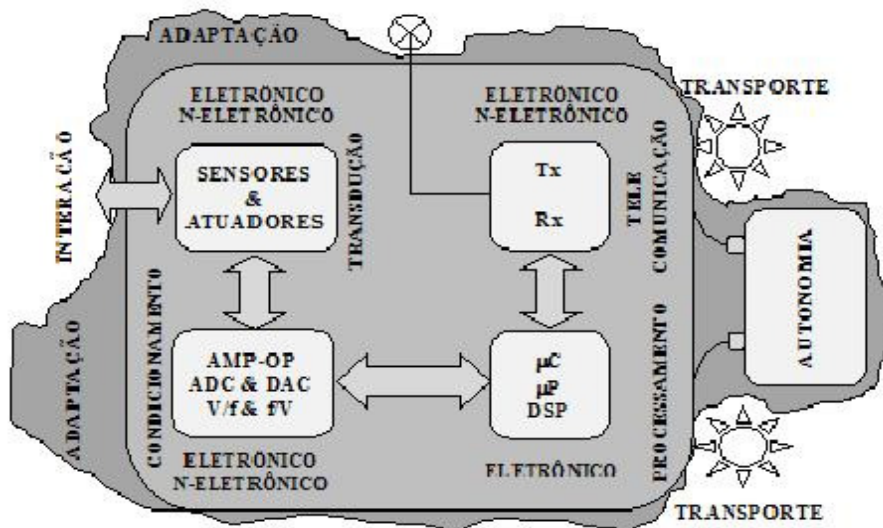


Figura 1.2: Esquema conceitual e funcional de um microssistema.

Fisicamente, o MEMS é um sistema que consiste de microestrutura, microeletrônica, microssensores e microatuadores eletromecânicos (conforme Figura 1.3). Os microssensores detectam os sinais das grandezas físicas pré-programadas, cujos sinais ao serem microprocessados geram comandos que ordenam ao microatuador executar determinado movimento.

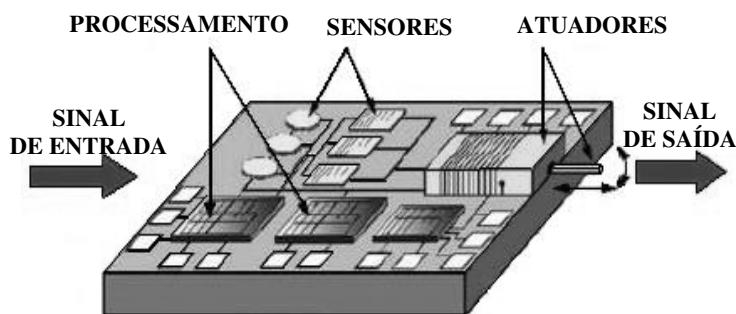


Figura 1.3: Ilustração tridimensional de um MEMS (DAO, 2002).

1.2.1 Evolução dos MEMS

A evolução dos MEMS tem acontecido na medida em que seu conceito e as aplicações se consolidam. Num primeiro momento, os processadores se consolidaram com o advento da microeletrônica. A seguir foi à vez da transdução, tanto que, os microssensores se tornaram atrativos quando ligados a componentes eletrônicos que processam algoritmos matemáticos, atingindo o auge da sua utilização. Surgiram os sensores inteligentes, ou “*smart sensors*”, dotados com autoaferição, além da aquisição, processamento e armazenamento de dados sem a intervenção humana (SCHMALZEL, 2004).

Prosseguindo a evolução apareceram os microssensores sem fio, ou “*wireless sensors*”. Esta nova geração é cogitada na atualidade pela capacidade em comunicar-se através de radiofrequência (RF - *Radio Frequency*). O avanço da tecnologia, nesse tipo de sensores, conduziu à criação de redes de sensores sem fio, ampliando capacidades na monitoração, rastreamento, coordenação e processamento de dados, para serem utilizados em detecção de incêndio em florestas, detecção de enchentes, agricultura de precisão, interior de vulcões, oceanos, interior de máquinas, campos contaminados e minados, avaliação de danos de batalha, residências, indústrias, entre outros (HEALY, 2005).

No final da década de 1960, surgiram os primeiros microssistemas voltados para a área de análises químicas e bioquímicas, porém ainda sem interação com o meio. Atividades dos microlaboratórios (LoC - *Lab-on-a-Chip*), ou também dos microssistemas de análise total (μ TAS - *Micro Total Analysis Systems*), consolidaram-se com a análise de sangue e amostragem de tecidos nas áreas de medicina e das ciências biológicas (REYES, 2002).

Em 1982, Robert T. Howe demonstrou a possibilidade de produzir vigas de silício cujo desfecho resultou no primeiro microatuador de índole eletrostática. Posteriormente foram construídas vigas biengastadas. Este fato marcou o despertar do interesse na consolidação dos primeiros MEMS (TANG, 1989).

O contínuo avanço na tecnologia tem possibilitado a integração de múltiplos componentes, como processadores, controladores e memória, resultando na incorporação de sistemas completos num único *chip* (SoCs - *Systems-on-Chip*). O desafio será maior ao fazer o mesmo com os MEMS.

1.2.2 Aplicações

Ao adquirir funções ópticas, térmicas, magnéticas, mecânicas e químicas, os microsistemas aumentaram sua potencialidade e a gama de aplicações. Entretanto, a reciprocidade entre dificuldades e novas aplicações é mútua, porém não é fator limitante como é a imaginação de novas aplicações (WONG, 2006). Com toda essa evolução, as aplicações de MEMS podem ser divididas em seis campos principais: automotivo, aeroespacial, ambiente, militar, médico e telecomunicações, conforme ilustra a Figura 1.4.



Figura 1.4: Tecnologias envolvidas e aplicações típicas de MEMS.

Cabe destacar que os maiores investimentos em pesquisa para desenvolvimento de aplicações MEMS é o setor de segurança dos Estados Unidos. A partir deste fato, pode-se dizer que é indubitável os microsistemas serem diretriz e critério para as novas ciências e o novo desenvolvimento tecnológico do século XXI. Após consolidação dos MEMS, diversificações como MOEMS, Bio-MEMS, MEMS-RF e Power-MEMS (MPG – *Micro Power Generation*) mostram-se áreas promissoras.

Os MOEMS (*Micro Opto-Electromechanical Systems*) são utilizados para dirigir, orientar, filtrar e, em alguns casos, amplificar luz. Duas áreas de aplicação dos MOEMS se destacam: comutação óptica e projeção. No caso de aplicações em comutação óptica utilizam-se microespelhos para orientar a entrada ou saída de luz na fibra óptica. Cada microespelho mostrado na Figura 1.5.a é menor que a cabeça de um agulha. O projetor digital de luz para processamento digital (DLP - *Digital Light Processing*), ilustrado na Figura 1.5.b, desenvolvido e produzido pela *Texas Instruments*, é uma das mais recentes inovações. Consiste numa variedade de espelhos móveis, com eletrodos instalados por debaixo dos espelhos, de forma a ajustar o posicionamento dos mesmos. Sua utilização é prevista para a televisão de alta definição.

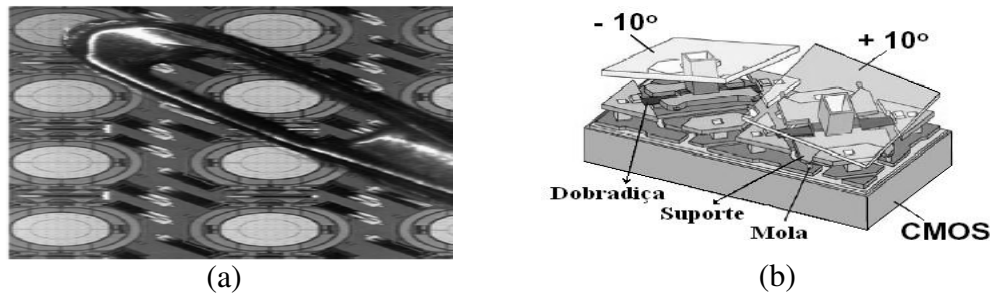


Figura 1.5: Aplicações MOEMS: (a) arranjo de microespelhos, (b) espelho digital (DMD – *Digital Mirror Device*) usado em sistemas digitais de projeção (HORNBECK, 2008).

Os Bio-MEMS, no campo da medicina, são de fundamental importância nas atividades de pesquisa, desenvolvimento, diagnóstico, terapia e monitoração de funções biológicas e bioquímicas, tanto de humanos como de animais (HAGA, 2004). Os Bio-MEMS também se destacam no projeto de implantes, detectores de drogas ou contaminantes, e medicamentos “inteligentes” (ver Figura 1.6.a). O sucesso alcançado está na atuação eficiente sobre a doença, pois substitui tratamentos convencionais e prolongados. A cauterização de microvasos sanguíneos com micropinças é relevante em medicina, pois evita micro-hemorragias (conforme Figura 1.6.b). E por que não mencionar os avanços obtidos em relação ao coração, onde dispositivos medem a pressão do mesmo (ver Figura 1.6.c).

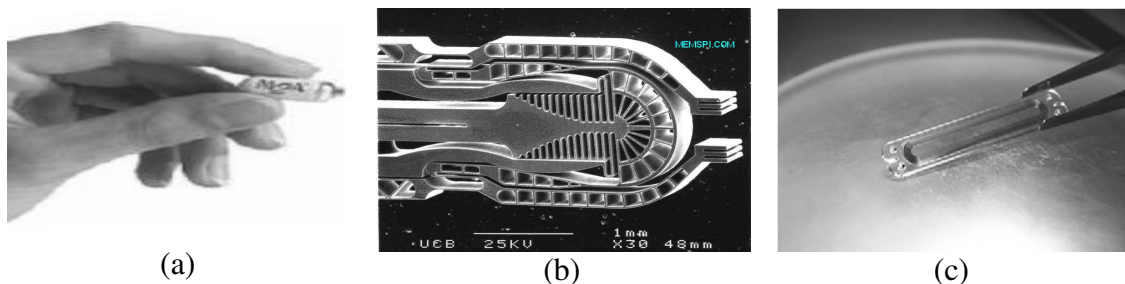


Figura 1.6: Bio-MEMS: (a) endoscopia (GILLES, 2008), (b) cauterizador vascular (JUDY, 2000), (c) cardio-MEMS (HAGA, 2004).

Os MEMS também se destacam nas telecomunicações. O sucesso é resultado da flexibilidade, alto desempenho, sintonia e ampla faixa de frequências de operação que apresentam, como é o caso dos ressonadores na Figura 1.7.a e do indutor suspenso na Figura 1.7.b.

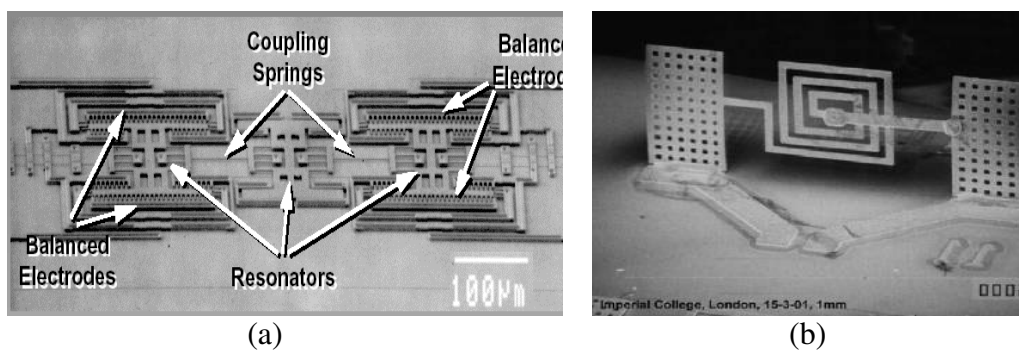


Figura 1.7: Telecomunicações: (a) ressonadores (LIN, 1998), (b) indutor suspenso (WU, 2003).

Os sensores e os atuadores para MEMS quando combinados e integrados constituem-se num novo dispositivo que desempenha uma nova função como transformação, amplificação, filtragem, mixagem, entre outras (NGUYEN, 1995), (WANG, 1999), (RIBAS, 2000).

O PG-MEMS (MPG-*Micro Power Generation*) é uma nova categoria de dispositivos cujo objetivo é utilizar MEMS para gerar energia a fim de permitir autonomia em microssensores e microatuadores (ver Figura 1.8).

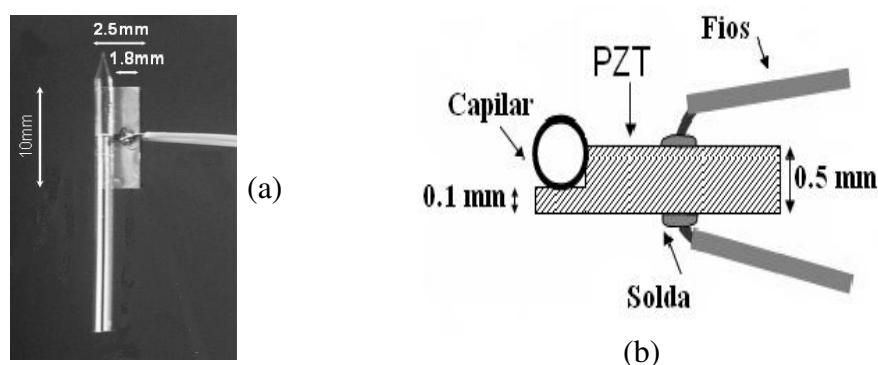


Figura 1.8: PG-MEMS: (a) dispositivo físico, (b) representação (BOZKURT, 2006).

A alternativa inicial é a célula combustível, em particular, a energia química. Esta, sob a forma de armazenamento de combustível sólido ou líquido, é intrinsecamente muito mais elevada do que a melhor bateria *lithium-ion* (HAVEL, 2007).

1.2.3 Mercado

Os dados sobre a dimensão atual e a previsão de tendências dos MEMS no futuro (conforme Figura 1.9.a) na relação mercado e estrutura industrial, permitem examinar o cenário estratégico dessa tecnologia. Segundo YOLE DEVELOPMENTS, estima-se que o mercado de MEMS, alcance um valor de US\$14 bilhões em 2012, o que representa US\$7,1 bilhões, ou seja, o dobro do ano de 2007. Para o ano de 2008, o mercado projeta US\$7,8 bilhões, que corresponde a uma taxa de crescimento anual composta de 14% (CAGR - *Compound Annual Growth Rate*). O crescimento de 2007-2010 é modesto (11%). O forte crescimento é esperado somente após 2010 (HARSÁNYI, 2005).

A Figura 1.9.b mostra que em 2002 o setor dos microfluidos se destacou. Outros tipos de sensores ficaram num nível intermediário. De 2002 a 2007 (conforme Figura 1.9.c) verifica-se uma diminuição das porcentagens apresentadas com acomodação de $\pm 3\%$ no consumo (FERNHOLZ, 2006). Ainda é cedo para concluir sobre o impacto da tecnologia MEMS nos bens de consumo, porém a demanda é crescente e as tendências do mercado são otimistas.

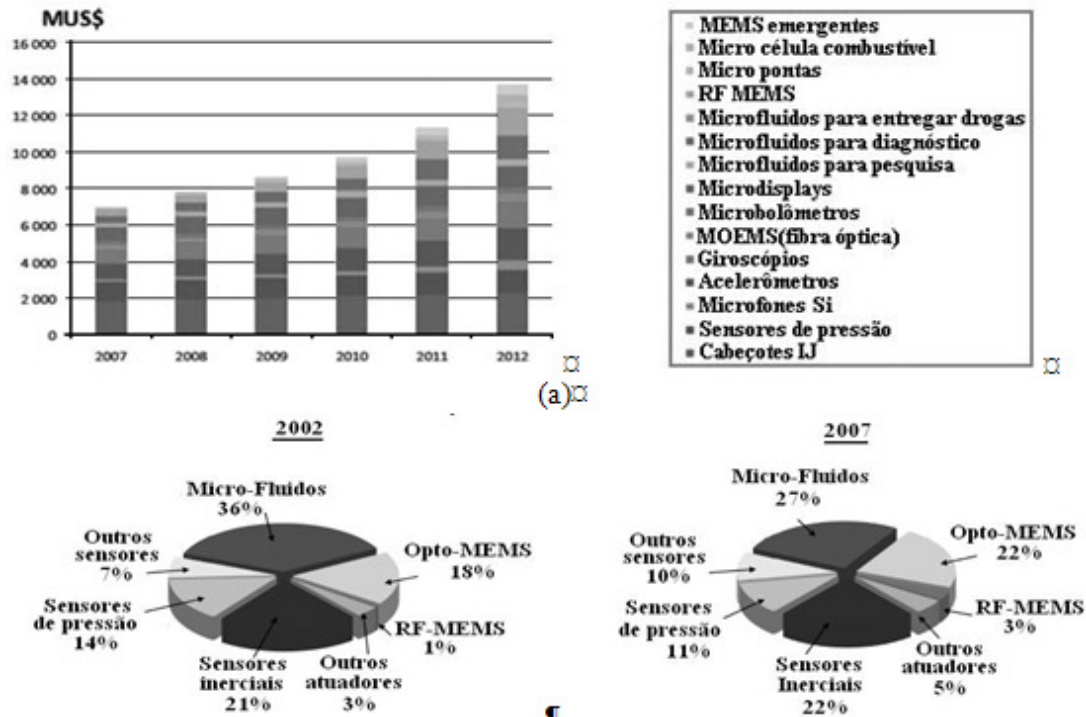


Figura 1.9: Mercado e utilização de MEMS: (a) demanda em MUS\$ (YOLE DEVELOPMENTS, 2007), (b) uso de MEMS em 2002, (c) uso de MEMS em 2007 (MINIPAN, 2006).

1.2.4 Projeto Auxiliado por Computador

A tecnologia MEMS é classicamente descrita através de três estágios: (a) “Pesquisa e Desenvolvimento”, (b) “Produto e Desenvolvimento” e (c) “Produção” (POLOSKY, 2006). Através do gerenciamento e controle desses três estágios a indústria tenta superar os quesitos de qualidade e de custo, de forma a conquistar o mercado.

O projeto é uma fase do estágio de “Produto e Desenvolvimento” e está relacionado estritamente ao setor de produção. Este destaca-se pelas inúmeras contribuições recebidas na tentativa de dinamizá-lo. Com este propósito o projeto de dispositivos MEMS é executado em quatro diferentes níveis: descrição e análise do sistema, análise e simulação do dispositivo, construção do layout e geração automática, e, finalmente, estrutura ou simulação de baixo nível. Cada um destes níveis é auxiliado por diferentes CADs (*Computer Aids Design*).

Para a simulação e análise do comportamento de MEMS, em nível de sistema, utiliza-se linguagem de descrição de hardware analógico (*HDL-A-Hardware Description Language*). Esta linguagem facilita a descrição de dispositivos para diferentes domínios de energia. O VHDL originalmente foi projetado para descrever a estrutura e o comportamento de sistemas de tempo discreto. Recentemente, extensões da linguagem VHDL têm sido definidas possibilitando a descrição de sistemas contínuos no tempo. A combinação de linguagens em tempo contínuo e em tempo discreto denomina-se de linguagem de descrição de *hardware* de sinal análogo e mixado (*VHDL-AMS Hardware Description Language – Analog and Mixed Signal*). O termo *signal mixed* refere-se aos sistemas que trabalham com acoplamento de energias diferentes (TATYANA, 2007). Outra linguagem utilizada é o Verilog-A. o objetivo deste é permitir que os projetistas de sistemas analógicos e circuitos integrados criem e

utilizem módulos que englobam alto nível comportamental de descrições estruturais, bem como descrições de sistemas e componentes. O comportamento de cada módulo pode ser descrito matematicamente em termos dos seus terminais e parâmetros externos aplicados ao módulo. A estrutura de cada componente pode ser descrita em termos de outros componentes interligados. Outro aplicativo é o Simulink[®], o qual é um software de simulação baseada na representação por esquemas de blocos. É uma extensão gráfica do MATLAB[®]. No Simulink[®], os sistemas são desenhados interligando blocos. Estes estão disponíveis em pastas de ferramentas que incluem fontes e dispositivos de saída como osciloscópios.

O macro modelo obtido através da utilização dessas ferramentas computacionais deverá ter a correta dependência das propriedades do material e da geometria do dispositivo. Deverá representar tanto o desempenho estático como dinâmico do dispositivo, ambos para pequenas amplitudes de excitação (lineares), e para grandes amplitudes de excitação (presumidamente não-lineares). Finalmente o macro-modelo deverá concordar com os resultados de simulações 3D a nível físico, e com os resultados experimentais de estruturas de teste.

1.2.5 MEMS versus Microeletrônica

Os dispositivos MEMS estão sendo considerados como a tecnologia do século XXI com um mercado de 34 bilhões de dólares em 2006. Comparando-se os mercados de ambas as tecnologias, o mercado da microeletrônica é maior, embora, também o próprio crescimento dos MEMS contribua para incrementá-lo.

As vantagens dos dispositivos MEMS, em grande parte, são procedentes da própria microeletrônica. Uma dessas vantagens é a produção em lotes (*batch*), o que resulta em baixo custo para grandes volumes de componentes. Outra vantagem é o silício e o óxido de silício. Ambos os materiais são relativamente baratos e abundantes, com propriedades mecânicas, químicas e elétricas excelentes, e são processados sob as mesmas técnicas da microeletrônica para a construção de MEMS. Outro aspecto são as metodologias de teste utilizadas. Algumas delas têm sido estrategicamente similares às utilizadas com componentes semicondutores, embora outras tenham sido desenvolvidas sobre o princípio de funcionamento dos próprios MEMS. No que se referem à modelagem matemática, as primeiras técnicas de redução da ordem do modelo utilizadas para simulação do comportamento de MEMS, foram emprestadas da modelagem de dispositivos semicondutores.

Entretanto, a diferença predominante entre ambas as tecnologias é o elemento básico que a microeletrônica desenvolveu como é o caso da junção PN. Esta é um elemento simples que ao ser combinado com outros elementos semelhantes produz dispositivos para diversas funcionalidades, porém em MEMS cada dispositivo é único.

1.3 Motivação

Atribuir “qualidade total” aos MEMS implica garantir sua adequação ao uso. Em outras palavras é superar as expectativas de mercado, concepção, especificação, tecnologia, mão-de-obra, gerenciamento, confiabilidade, manutenibilidade, suporte logístico, prestação e competência.

O tempo de desenvolvimento do MEMS é prolongado. Trabalhos científicos estabelecem que, para desenvolver um novo dispositivo MEMS, a média é de cinco anos, e ainda é necessário outro período igual para fazer este chegar ao mercado

(DENG, 2005). Outros autores ainda declaram que o desenvolvimento de MEMS necessita aproximadamente quinze anos (LITOVSKI, 2005). Este fato se justifica pela falta de um sistema de gerenciamento abrangente e eficaz, durante o projeto dos dispositivos MEMS até os pormenores da produção e sua entrega ao mercado. Logo, a falta de padrão, ou a formalização do processo, e a falta de instrumentos adequados conduzem ao método quase empírico de "construir e testar" aproximações de dispositivos MEMS inicialmente idealizados.

Cabe, também, considerar que modelagem computacional, simulação e verificação têm limites. A investigação de técnicas de discretização, compactação e de redução de ordem do modelo continua a diminuir a demora no processamento dos modelos comportamentais, porém ainda não atingindo a automatização do processo.

Garantir a robustez e a confiabilidade é extremamente difícil devido à complexidade e à natureza heterogênea da maioria dos dispositivos MEMS. É necessário salientar que ter o conhecimento de todos os fenômenos que se manifestam no MEMS não é trivial, porque as grandezas dimensionais obedecem a ordens micrométricas. A modelagem matemática utilizada para analisar e obter o comportamento dos dispositivos MEMS é a modelagem fenomenológica. Esta requer o conhecimento profundo do dispositivo através das relações matemáticas que descrevem os fenômenos envolvidos com o mesmo. É evidente que, na medida do avanço da miniaturização e da integração, também avançam as dificuldades na compreensão dos novos fenômenos que surgirão. Isto deve complicar e dificultar a obtenção do modelo matemático comportamental (LIENEMANN, 2006).

Cabe considerar que o encapsulamento de MEMS, devido à unicidade e às áreas específicas de aplicação dos mesmos, requerem alta confiabilidade. Dispositivos RF-MEMS necessitam ser encapsulados a vácuo, ao contrário de micropinças para cauterização de vasos sanguíneos. Também cabe considerar que os estímulos utilizados em testes não são unicamente elétricos. Os dispositivos podem necessitar de estímulos e medições não elétricas, incluindo som, luz, vibração, pressão e temperatura, entre outras. Os métodos utilizados nos testes, atualmente, necessitam explorar todo o espectro de frequências, o que implica a utilização de diferentes geradores durante o teste, principalmente quando o assunto são testes modais. Conseqüentemente, as metodologias de teste e instrumentação apresentam elevado custo.

No estágio de produção, é necessário otimizar a capacidade de fabricação em volumes (*batch*), desenvolver soluções para equipamentos de produção e também satisfazer as necessidades de testes. Os ensaios e diagnósticos demandam repetitivas análises necessárias não só para aperfeiçoar o projeto, mas também para constatar se houve cobertura de todas as possíveis falhas, e só então, criar uma biblioteca de falhas. Obter os modelos de falha em nível de sistema dos dispositivos MEMS é necessário (LITOVSKI, 2005).

Fundamentalmente, a interação do MEMS depende de atuadores. A causa disto tenha sido talvez o exacerbado desenvolvimento de microssensores durante a II Guerra Mundial e após, no período da Guerra Fria dominado pela corrida armamentista e conquista do espaço. A prioridade aos sensores criou, indiretamente, uma falta de investimento e pesquisa de atuadores, a qual atingiu seu ápice ao alterar o cronograma que rege o advento de micro e nano robótica (MONZÓN, 2003).

Conforme o exposto, a caracterização de dispositivos MEMS numa faixa de frequência estreita e num intervalo de tempo reduzido, assegurando a qualidade e o baixo custo desses dispositivos é desejável. Os parâmetros característicos contêm

informação da geometria e das propriedades dos materiais utilizados na construção dos próprios dispositivos. A inserção desses parâmetros num modelo matemático linear facilita, porquanto permite que o projetista pense rápido, agilize os cálculos e analise o desempenho comportamental, tanto estático como dinâmico, em nível de sistema. Obter os parâmetros característicos do macromodelo que descreve o comportamento linear dos atuadores eletromecânicos MEMS garantindo a qualidade e o baixo custo desses dispositivos é a motivação deste trabalho. Portanto, tal motivação visa a contribuir com a proposta de Feynman, procurando consolidar a interatividade dos MEMS.

1.4 Objetivo

O estudo e desenvolvimento dos aspectos citados focam como objetivo deste trabalho a obtenção dos parâmetros característicos necessários ao modelo matemático de atuadores MEMS, de forma a descrever com precisão o comportamento linear destes.

Para que o objetivo principal seja alcançado, os objetivos específicos são os seguintes:

- Estudar a proposta de Feynman.
- Investigar os fundamentos dos atuadores MEMS.
- Identificar os modelos matemáticos mais usados na obtenção de parâmetros característicos de sistemas.
- Investigar alternativas que tenham sido propostas recentemente e possam contribuir na modelagem matemática de MEMS.
- Propor uma metodologia para obter os parâmetros característicos dos atuadores MEMS.

A consolidação desse objetivo tornar-se-á contribuição científica ao aperfeiçoamento do projeto de MEMS, uma vez que o método desenvolvido seja incorporado em qualquer ferramenta computacional de projeto, permitindo-lhe detectar possíveis defeitos tanto na etapa de projeto quanto na avaliação após fabricação. Posteriormente, este método deve ser estendido a outros dispositivos MEMS além dos atuadores, tornando-o de uso universal nos CADMEMS.

1.5 Estruturação

O Capítulo 2 é uma introdução às propriedades da matéria no intuito de enfatizar a primeira proposta de Feynman. O segundo aspecto desenvolvido consiste na conceituação de atuadores, e principalmente daqueles baseados em deformação elástica e ação eletrostática destacando a estrutura *comb-drive*. O objetivo é consolidar a segunda idéia de Feynman. Para finalizar o capítulo, breve visão sobre simulação e a verificação no projeto e os testes no estágio de produção de MEMS são apresentados.

O Capítulo 3 apresenta a proposta que consolida o objetivo indicado, inicialmente, no Capítulo 1. Ao mesmo tempo, mostra a revisão sobre contribuições científicas encontradas na literatura, especificamente, no projeto de atuadores MEMS. Mostra alguns critérios que permitem estabelecer quando *hardware* ou *software* obedecem ao princípio inteligente, investigando como incorporá-lo à fase de projeto. Decorrente deste processo aduz-se a contribuição definitiva deste trabalho, obtendo-se o

modelo para o desempenho linear e a técnica a ser aplicada com as etapas necessárias à obtenção dos parâmetros característicos do atuador eletromecânico.

O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento das etapas da técnica escolhida no Capítulo 3, e os resultados com seus respectivos comentários decorrentes dos ensaios realizados sobre as topologias selecionadas. A análise dos resultados é feita através da comparação dos dados obtidos a partir da plataforma teste, a qual é desenvolvida sob a ferramenta computacional de elementos finitos ANSYS[®] (*Analysis Systems*) (SWANSON, 1998). O comportamento dos parâmetros característicos conseguidos através da técnica é comparado com o desempenho dos resultados experimentais da plataforma teste a partir da utilização do software MATLAB[®] (IZHAM, 2004).

O Capítulo 5 apresenta os comentários ao desenvolvimento do trabalho. Os objetivos traçados nos Capítulos 1 e 3 são analisados de forma a constatar os aportes qualitativo e quantitativo feitos ao projeto de MEMS. Finalmente, propõem-se novos trabalhos que consolidem e propiciem a continuidade desta investigação.

2 FUNDAMENTOS DE ATUADORES MEMS

Este capítulo apresenta o estudo realizado sobre atuadores MEMS baseados em deformação elástica e estrutura *comb-drive*. O capítulo visa também mostrar a constituição desses dispositivos, seu princípio de funcionamento, as diferentes tipologias, tanto para dispositivos com deformação elástica como para os *comb-drives* translacionais, e seus parâmetros característicos. Focando o interesse investigativo sobre os MEMS baseados em deformação elástica com um grau de liberdade e *comb-drive* translacional de ação longitudinal. Também, descrevem-se os níveis do projeto de MEMS e a utilização da modelagem matemática neste. Para finalizar o capítulo a produção, fabricação e testes de MEMS são brevemente considerados.

“As leis naturais não podem ser violadas, há que respeitá-las.”
Richard P. Feynman (1918-1988)

2.1 Propriedades da Matéria

O homem sempre procura compreender melhor a estrutura do universo e suas manifestações através da concretização e não da abstração. A origem da palavra vem do latim *materia*, que significa “substância física” e Einstein a definiu como energia que vibra em baixa frequência; mostrando a substancial identidade entre a energia e a matéria e a possibilidade de transformar uma na outra (BARCELLOS, 2002). A menor porção da matéria ou matéria-energia elementar são os prótons, nêutrons e elétrons, os quais satisfazem como limite o desenvolvimento deste trabalho.

A sutileza na conversão matéria-energia não é evidente, mas está presente nos átomos e é regida pelos princípios e interações entre partículas elementares que agregam três estados à matéria: sólido, líquido e gasoso. As propriedades da matéria são características que, em conjunto, definem a espécie da mesma. Essas propriedades são divididas em três grupos: gerais, funcionais e específicas.

- ***Propriedades gerais:*** são inerentes a toda matéria como inércia, massa, extensão, impenetrabilidade, divisibilidade, compressibilidade, elasticidade e porosidade.
- ***Propriedades funcionais:*** são comuns a determinados grupos de matéria, identificados pela função que desempenham.
- ***Propriedades específicas:*** são individuais de cada tipo particular de matéria. Podem ser reagrupadas em organolépticas, químicas ou físicas.

As propriedades organolépticas são capazes de impressionar os sentidos humanos. Entretanto, as propriedades químicas são as responsáveis pelos tipos de

transformação que a matéria é capaz de sofrer, relacionando a maneira de reagir das substâncias. E, finalmente, as propriedades físicas são aquelas que descrevem o comportamento da transformação como pontos de fusão e solidificação, pontos de ebulição e condensação, densidade, coeficiente de solubilidade, dureza, tenacidade e brilho.

As reações químicas consistem na separação, combinação ou rearranjo de átomos, mas nunca na criação ou destruição destes. As ligações interatômicas podem ser agrupadas, quanto à intensidade das forças, em ligações primárias (ou fortes) e ligações secundárias (ou fracas). As ligações primárias são dez vezes mais fortes que as ligações secundárias e se dividem em três tipos: iônica, covalente e metálica. As ligações fracas são, geralmente, englobadas dentro da designação de van der Waals (VAN BLACK, 1985).

No arranjo dos átomos normalmente somente se envolvem os elétrons da última camada (mais afastados do núcleo) os quais são responsáveis pelo comportamento químico do elemento e são denominados elétrons de valência. Desta forma cada átomo adquire uma configuração eletrônica estável. Quando os átomos aproximam-se uns dos outros seus núcleos e elétrons interagem e tendem a se distribuir no espaço de tal modo que a energia total do sistema seja menor que qualquer outro arranjo possível. Se a energia total de um agrupamento for menor que a somatória das energias dos átomos isolados, eles então se ligam, e a diminuição de energia é chamada de energia de ligação (LOPES, 1993).

Os átomos podem-se organizar, obedecendo a uma estrutura cristalina. Esta é uma rede de pontos regularmente espaçados com uma distribuição regular dos átomos. Os materiais que obedecem a essa distribuição são denominados de materiais cristalinos. O termo microestrutura é mais abrangente de forma que engloba a estrutura cristalina, a composição química e os tratamentos térmicos e mecânicos aplicados ao material. Muitas das características estruturais como o tamanho dos grãos que governam as propriedades dos materiais estão dentro da faixa da microestrutura (PADILHA, 1997).

Portanto, as propriedades da matéria são definidas a partir da associação de átomos, da ligação existente entre eles, do tipo de estrutura cristalina, do processamento e da microestrutura gerada. Esta breve descrição permite pensar na primeira proposta de Feynman (FEYNMAN, 1992): “novos propriedades, novos materiais”, sempre e quando se consiga interagir com os átomos um a um ou em lotes.

2.2 Transdução ou Conversão de Energia

Do ponto de vista da Física, distinguem-se diferentes formas de energia: atômica, elétrica, gravitacional, magnética, mecânica, molecular e irradiante. É necessário agrupar a energia atômica e molecular numa única forma denominada energia química. E que a energia gravitacional e mecânica sejam ambas expressas através de grandezas mecânicas. O que resulta em seis formas de energia: química, elétrica, magnética, mecânica, irradiante e térmica.

A conservação da energia, como aspecto primordial, estimula a monitorá-la, transformá-la e utilizá-la convenientemente. Os sensores são classificados obedecendo a diversos aspectos considerados na “Análise de Sistemas” como regime de operação, forma de energia na entrada *versus* forma de energia na saída, propriedades dos sinais de entrada, perturbação e saída, mensuração, parâmetros característicos; número de

entradas e saídas e conseqüente conexão externa. Entretanto, o desenvolvimento deste trabalho utilizar-se-á unicamente dos critérios “formas de energia” e “entrada *versus* saída” de maneira a conceituar qualidades atribuídas ao sensor como transdutor, atuador, gerador e motor.

O termo transdutor deriva do latim *transducere*, que significa “levar através”. A analogia de transdutor com tradutor conceitua melhor o termo. O transdutor é um caso particular de sensor, como representado na Figura 2.1 (SZE, 1994).



Figura 2.1: Fluxo de energia e estímulo/resposta do sensor transdutor.

Estímulos ou excitações provenientes de formas de energia elétrica e mecânica caracterizam o transdutor como “transdutor eletromecânico”. Porém, outras particularidades aparecem quanto à funcionalidade, como na Figura 2.2.

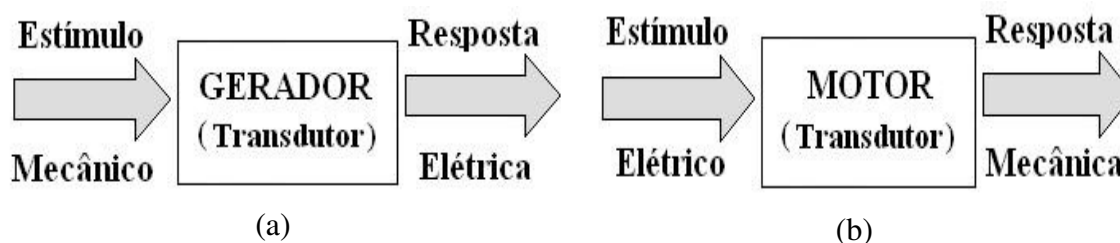


Figura 2.2: Transdutores: (a) gerador; (b) atuador.

Caso o transdutor receba energia elétrica e a transforme em energia mecânica é denominado de “atuador”, caso contrário, “gerador”. Na literatura científica definir transdutor é polêmico, uma vez que algumas definições são abrangentes demais e outras bastante restritas o que impede conceituar convenientemente. Entretanto, a definição apresentada é adequada a este trabalho.

2.2.1 Dinâmica e Cinemática

A Física Clássica define o movimento como a variação da distância entre o corpo e o referencial. A classificação do movimento obedece à classificação dos corpos em rígidos e não rígidos. Corpo rígido, ou conceito ideal do indeformável, é o constituído por partículas com posições relativamente fixas e independentes da força que é aplicada. Corpo real perfeitamente rígido não há. Se numa primeira aproximação a deformação é desprezível considera-se como tal.

O corpo rígido realiza dois tipos de movimento: translação e rotação. É dito de translação quando a direção de qualquer segmento, que une duas de suas partículas, não se altera durante o movimento. Isto implica que todos os pontos do corpo em movimento de translação descrevem curvas paralelas. Todas as partículas sofrem o

mesmo deslocamento durante o mesmo intervalo de tempo, de modo que todas possuem em qualquer instante a mesma velocidade e aceleração. A direção das forças aplicadas define dois tipos de translação: longitudinal e transversal. É denominada “longitudinal” quando o movimento é paralelo à direção da força, e, caso o seja perpendicular à direção desta, o movimento de translação é dito “transversal”. Por outro lado o movimento é dito rotacional quando é realizado em torno de um ponto qualquer, com trajetória circular de raio (d_r) em relação a outro ponto qualquer do mesmo corpo.

As translações e rotações independentes (ou “movimentos fundamentais”), que determinam a flexibilidade de movimentação do corpo rígido livre representam os graus de liberdade (DOF – *Degree of Freedom*). Um corpo rígido no espaço tem seis graus de liberdade correspondentes a três translações, segundo três direções ortogonais e três rotações em torno dos três mesmos eixos. A combinação de translação e rotação produz movimento roto-translacional.

O movimento não rígido ou deformação pode ser classificado em articulado, elástico ou fluídico. O movimento articulado ocorre se as partes rígidas do corpo se movem independentemente das restantes. O movimento elástico caracteriza-se pelo movimento não rígido com algum grau de continuidade e suavidade de maneira a modificar a forma do corpo, os parâmetros geométricos e as propriedades intrínsecas do material. O movimento fluídico é um movimento não rígido que não satisfaz a restrição de continuidade, podendo envolver variações topológicas e deformações turbulentas (TAVARES, 2002).

O movimento, também pode ser classificado conforme sua velocidade em uniforme, variado e periódico. O primeiro mantém a velocidade constante e, no segundo, a velocidade varia com o tempo. Finalmente, no periódico, o movimento se repete após intervalos de tempo definido (DE LOS SANTOS, 1999), (WANG, 1999).

2.2.2 Movimento Elástico

Quando uma força é aplicada na superfície de um corpo ela pode causar mudanças na forma e/ou volume. A oposição oferecida a essas mudanças e o retorno à forma e/ou volume inicial após a retirada das forças é o que se denomina de propriedade da elasticidade (PORTELA, 1996). A tensão é a força por unidade de área. Se aplicada perpendicular à área em que atua é denominada tensão normal; e quando aplicada tangencialmente é denominada de tensão cisalhante. Caso um corpo seja submetido a algum tipo de tensão ele pode sofrer mudança nas suas formas e/ou dimensões. Essa alteração é denominada deformação ou deformação específica ϵ .

A deformação pode ser normal e cisalhante. A deformação normal, (ϵ_l) é aquela cujo resultado físico é a alteração do volume do corpo sem modificar a forma quando uma força é aplicada perpendicularmente ao corpo. Entretanto, a deformação cisalhante (ϵ_T) é aquela cujo resultado físico é a alteração da forma sem modificar o volume quando uma força é aplicada tangencialmente ao corpo. A relação dessas duas deformações é expressa através da razão de Poisson e definida pela expressão (2.1):

$$\nu = \left| \frac{\text{deformação específica transversal}}{\text{deformação específica longitudinal}} \right| \quad (2.1)$$

Entretanto, a Figura 2.3 mostra o comportamento da tensão em função da deformação.

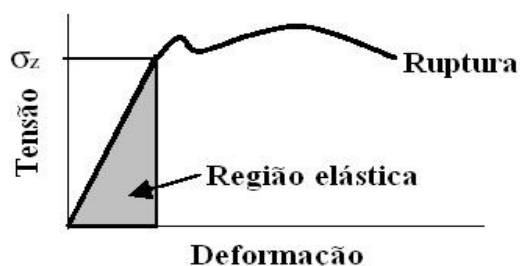


Figura 2.3: Curva Tensão vs. Deformação (NASH, 1976).

A razão de Poisson é fundamental para relacionar diferentes formas de deformação, principalmente em dispositivos cujo movimento obedece a esse princípio.

2.3 Atuador Eletromecânico

Os atuadores eletromecânicos são transdutores que convertem energia elétrica em energia mecânica. A concepção de qualquer atuador demanda dois blocos funcionais e uma função unívoca, que estabeleça a relação entre o sinal de entrada e o sinal de saída, como mostra a Figura 2.4.



Figura 2.4: Atuador eletromecânico em diagrama de blocos.

O bloco denominado de acionador, idealmente desempenha duas funções, monitoração e geração de força, sendo constituído por dois blocos: um sensor e um “gerador fenomenológico”. O bloco “meio” tem como finalidade canalizar a manifestação da força aplicada através de movimento. Dependendo da cinemática este bloco pode conter outros (corpo rígido ou/e corpo não rígido) de forma a aperfeiçoar o desempenho mecânico.

A ressonância e o limite de elasticidade são os parâmetros que definem a função unívoca na maior parte dos atuadores eletromecânicos baseados na deformação elástica. A ressonância é um fenômeno físico que registra transferência de energia de um sistema oscilante para outro sistema, o qual pode ser oscilante ou vibratório. A ressonância pode ser destrutiva ou não-destrutiva sendo esta última de fundamental interesse para o desenvolvimento do presente trabalho.

O princípio não destrutivo consiste em igualar a frequência do sistema oscilatório (f_0) à frequência natural (f_n) do sistema vibratório, de forma que as propriedades intrínsecas desse não sejam alteradas. Quando isto acontece a frequência do sistema é denominada de frequência de ressonância (f_r). A idéia fundamental consiste em aumentar a amplitude de vibração respeitando os limites de elasticidade do sistema vibratório de forma que este atinja maiores deslocamentos dos que possuía em estado natural. A frequência natural como parâmetro é necessária para comparar o desempenho entre atuadores eletromecânicos (WOOD, 1998), (LIN, 2006).

2.3.1 Atuadores Eletromecânicos Disponíveis

Entre os atuadores eletromecânicos mais estudados na literatura científica estão os de índole eletroquímica, eletrorrestritivos, eletromagnéticos e os eletrostáticos. Os atuadores eletroquímicos são utilizados na regulação da pressão ocular. Sua vantagem é a pequena região em que podem atuar e nas pressões e/ou volumes que são conseguidos nos líquidos ou gases para agir. Tem havido estudos para desenvolver novos materiais e aperfeiçoar seu desempenho, porém a informação sobre os mesmos é muito escassa. Possuem, ainda, alguns problemas práticos relativos à micro-fabricação e funcionamento.

Os atuadores eletrorrestritivos são comerciais. Utilizam materiais baseados em soluções PMN (*magnesium niobate*) e PZT (zirconate *titanate*). São investigados para serem utilizados em máquinas hidráulicas. Estes atuadores possuem custos elevados e pequenos deslocamentos, o que limita sua possibilidade de utilização. Também, exigem elevado grau de rigidez, grandes forças e altas frequências (CAI, 2005), (HERDIER, 2008).

Atuadores eletromagnéticos têm muitas vantagens, tais como: gerar forças de atração e repulsão que em alguns casos são proporcionais à corrente de entrada; apresentam respostas rápidas; ampla largura de banda e grandes deslocamentos. Operam sob amplas faixas de temperatura (aproximadamente, acima de 180°C). Também, quando considerados como alternativas são mais baratos. O desempenho dos atuadores eletromagnéticos é limitado principalmente pelas propriedades dos materiais utilizados para sua construção.

A tecnologia dos atuadores eletrostáticos é melhor que a dos eletromagnéticos ao compará-los em dimensões. Os atuadores eletrostáticos são pouco afetados pela temperatura ambiente e são altamente eficientes na atuação devido ao baixo consumo que apresentam. Estes podem gerar grandes forças, mas são limitados por deslocamentos curtos. Para preservar a força, num percurso comprido, é necessária maior diferença de potencial elétrico. As partículas de poeira na pior das hipóteses provocam desbalanceamentos ou curto circuitos na estrutura. Um atuador eletrostático simples, disponível comercialmente é o capacitor de placas paralelas. Este baseado em deformação elástica é de especial atenção (DOREY, 1995), (LIU, 1999).

2.3.2 Atuador Elasticamente Deformável e Estrutura *Comb-Drive*

Neste tipo de atuador o bloco acionador eletrostático monitora a diferença do potencial elétrico aplicado aos terminais de entrada. Esse potencial permite surgir uma força de índole eletrostática decorrente da preponderância das propriedades dos campos elétricos. O bloco massa-elástica é a combinação de um corpo rígido (massa) e um não rígido (mola). Este conjunto canaliza o movimento através da deformação e permite a manifestação da força eletrostática aplicada. A frequência de ressonância e o limite de

elasticidade, como a função moduladora, controlam o deslocamento respeitando as características intrínsecas no material. O diagrama em blocos da Figura 2.5 ilustra o caso particular do atuador MEMS baseado em deformação elástica e ação eletrostática.



Figura 2.5: Atuador MEMS elasto-deformável e ação eletrostática.

2.3.3 MEES - Microestruturas Elásticas Suspensas

Microestruturas suspensas são arranjos constituídos de partes móveis que se erguem sobre bases fixas. Essas microestruturas são constituídas por âncoras, engastes, pilares e vigas. A âncora é um elemento que além de dar sustentação, tem as funções de apoiar e elevar as vigas engastadas. Suas dimensões dependem da aplicação e do processo disponível para fabricação. O engaste perfeito é o apoio que não permite deslocamento e nem rotação em nenhuma direção. Outro componente das estruturas suspensas é a viga. Esta é um elemento colocado sobre apoios e possui as capacidades de receber ou transmitir esforços perpendiculares ao próprio plano. Além da viga, outro elemento importante é o pilar (do latim “*pilore*”), o qual é um elemento que recebe ou transmite forças de tensão ou de compressão, as quais são aplicadas ao longo do eixo longitudinal.

A microestrutura elementar é o *cantilever* (conforme Figura 2.6), o qual consiste numa microviga em balanço que se projeta para fora e tem um de seus extremos engastado, deixando livre o outro extremo. As diferentes combinações do *microcantilever* podem gerar outras microestruturas suspensas, as quais permitem conceber variadas topologias de molas cujo princípio se baseia na deformação elástica.

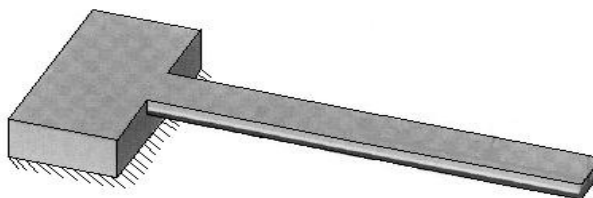


Figura 2.6: Viga engastada e em balanço, ou *microcantilever*.

A diversidade de micromolas existente, quando combinadas com massas vibratórias de diferentes geometrias, permite obter variadas tipologias de massas elásticas para as mais diversas aplicações. Para identificar a estrutura da massa elástica, o termo elasto-massa é acompanhado do nome da mola utilizada, como na Figura 2.7.

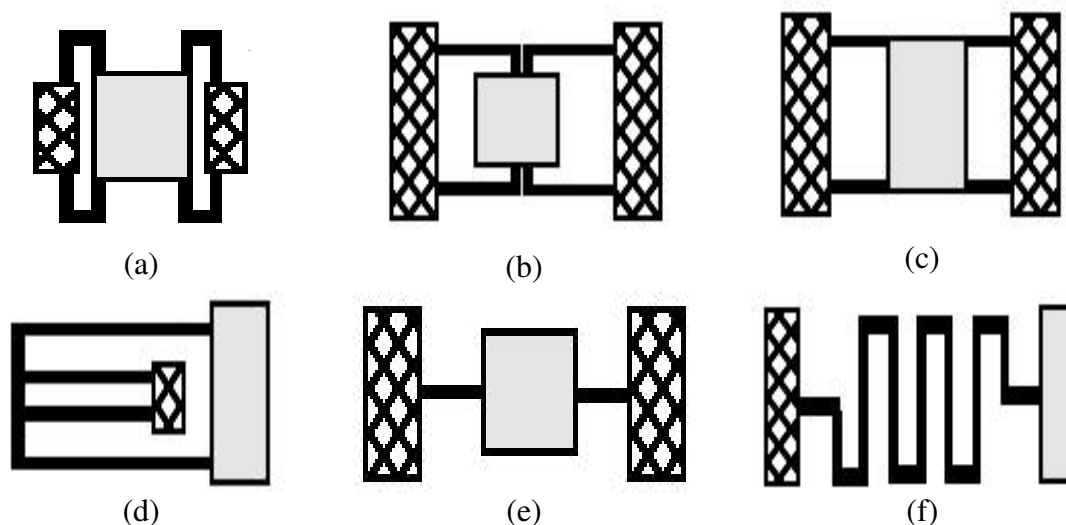


Figura 2.7: Topologias de elasto-massas: (a) forma U, (b) *crab*, (c) ponte dupla, (d) dobradiça dupla, (e) ponte simples, (f) serpentina (BAIDYA, 2002).

Dependendo da tipologia da mola, a massa-elástica pode ter vários graus de liberdade. Estes estão diretamente associados com o número de articulações ou número de eixos ortogonais, que as micromolas apresentam.

2.3.4 Estrutura *Comb-drive*

A capacitância é a propriedade física de opor-se a qualquer mudança à diferença de potencial elétrico. Em outras palavras, é a habilidade de armazenar energia elétrica a qual é feita sob um campo eletrostático. O dispositivo utilizado para armazenagem dessa carga (energia) é chamado de capacitor o qual consiste de duas placas separadas por um material do tipo dielétrico (ver Figura 2.8.a). O valor capacitância depende da geometria das placas, do dielétrico e da distância entre de ambas, como mostra a Figura 2.8.b, onde Q é a carga, C é a capacitância, V é a diferença de potencial elétrico, V_1 , V_2 e V_3 são potenciais elétricos e R a resistência elétrica.

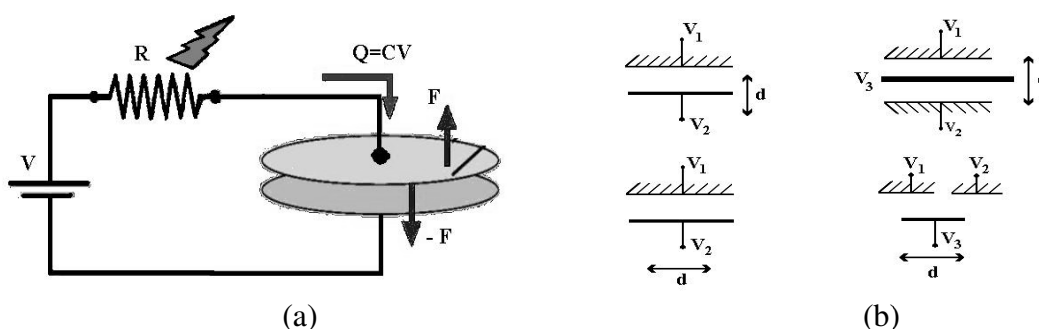


Figura 2.8: Capacitor: (a) placas planas e dielétrico, (b) mobilidade de ambos.

Por outro lado, o capacitor é um dispositivo que gera força eletrostática a qual depende da diferença de potencial aplicada aos terminais do capacitor e da variação dos parâmetros geométricos e da movimentação de suas placas, o que desperta o interesse

em diferentes topologias de capacitores. Uma delas é a estrutura “digital” (*inter-digited*) a qual apresenta inúmeras alternativas (conforme Figura 2.9.a - f).

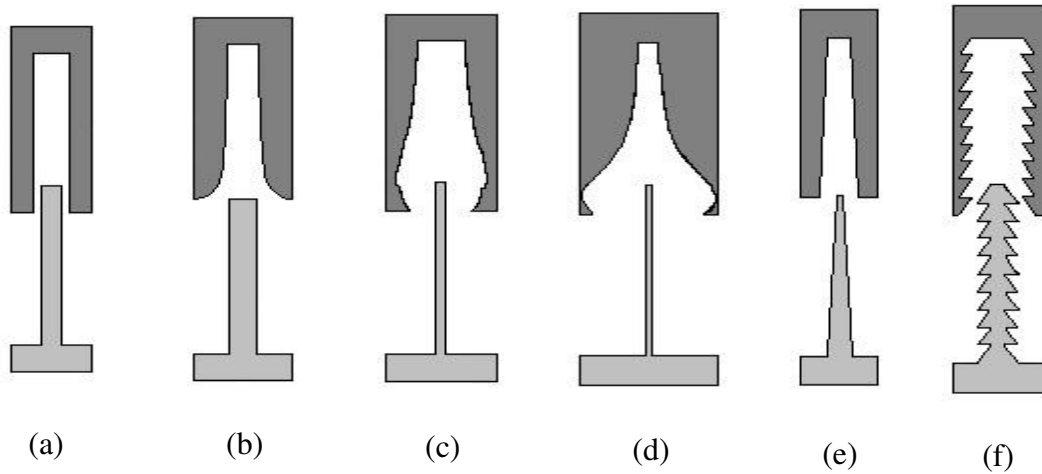


Figura 2.9: Diferentes topologias de dedos capacitivos: (a) reto, (b) grosso-oval, (c) copa fina, (d) copa grossa, (e) alfinete, (f) serra.

Idealmente, esta estrutura é nomeada pela forma análoga aos dedos. Sua estrutura física é formada por dois dedos, um fixo e outro móvel. Estes dedos são *micro-cantilevers* dispostos convenientemente para formar estruturas capacitivas, as quais possuem diferentes perfis, distância e permissividade elétrica, de forma a originar dedos capacitivos com forças eletrostáticas de diferentes intensidades.

Entretanto, até o momento o dedo reto (ver Figura 2.9.a) é o que se mostra eficiente quando comparado às demais tipologias, pois a intensidade da força eletrostática gerada é maior quando comparada a dos outros. Conforme a polarização das placas e a mobilidade delas, os dedos podem apresentar movimento lateral e longitudinal (observar Figura 2.10).

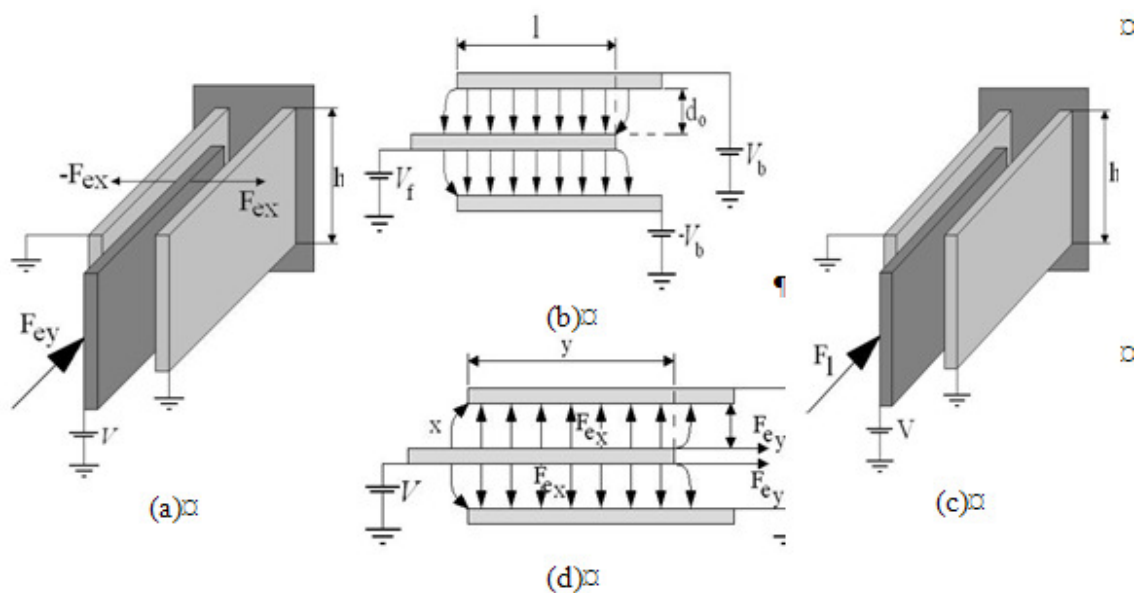


Figura 2.10: Deslocamento dos dedos: (a) capacitor longitudinal, (b) forças eletrostáticas laterais, (c) capacitor lateral, (d) forças eletrostáticas longitudinais.

A estrutura *comb-drive* é um arranjo repetitivo de dedos capacitivos cuja forma final obedece a pentes entrelaçados e, conseqüentemente, um dos pentes é fixo e outro móvel, o que dá origem ao próprio nome. Os *comb-drives* apresentam movimento de translação ou rotação segundo sua tipologia, como mostra a Figura 2.11.

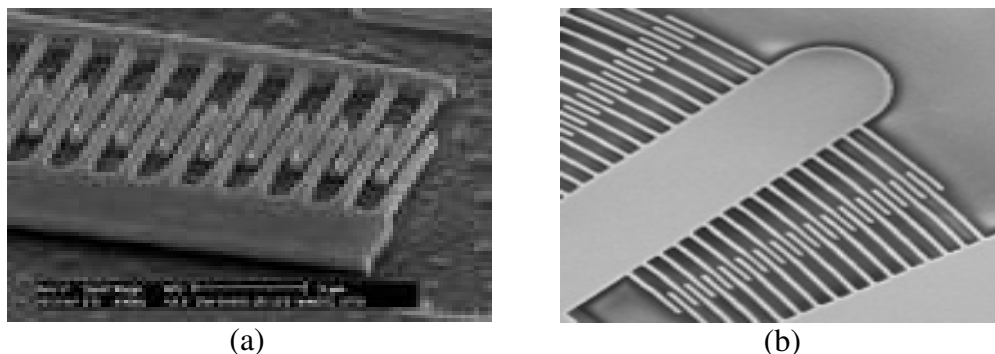


Figura 2.11: Tipos de *comb-drive*: (a) translação, (b) rotação (MICRALYNE, 2008).

O *comb-drive* de translação pode ser dividido em três tipos conforme a direção de seu deslocamento: ação lateral, ação longitudinal e ação vertical, como ilustrado na Figura 2.12.

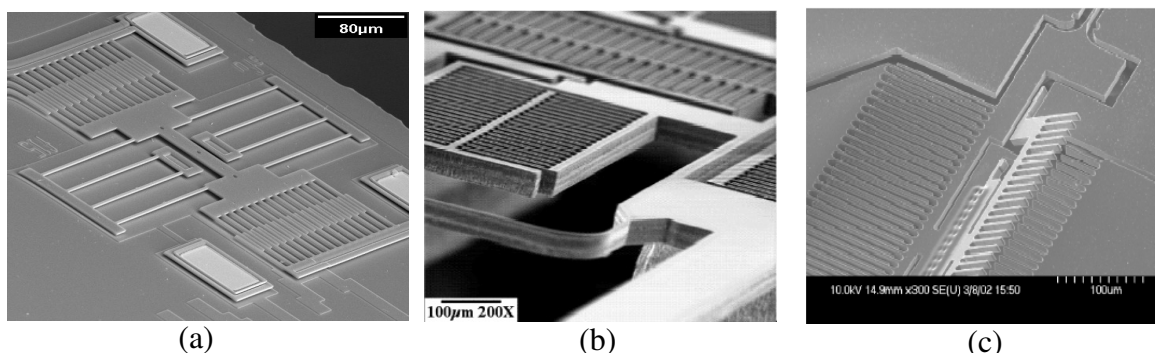


Figura 2.12: Tipos de *comb-drive* de translação: (a) longitudinal (JOHNSTONE, 2006), (b) lateral (SUN,2002), (c) vertical (NGUYEN, 2002).

Esta investigação foca seu interesse no *comb-drive* de ação longitudinal, pois possui tipologia simples, polarização unipolar e princípio funcional de fácil compreensão. Porém, esta estrutura possui desvantagem na utilização de potenciais elétricos elevados para produzir pequenos deslocamentos, além de elevada instabilidade tanto pela própria arquitetura das elasto-massas acopladas, quanto pelo próprio comprimento dos dedos dos pentes.

2.4 Projeto de MEMS

A história do MEMS como produto é descrita classicamente através de três estágios, “pesquisa e desenvolvimento”, “produto e desenvolvimento” e “produção”. Praticamente em MEMS, num primeiro momento, os dois últimos estágios apresentam maior destaque, porém o estágio de “produto e desenvolvimento” se destaca como consequência do projeto. Este consiste num procedimento único de atividades

coordenadas e controladas com datas para início e término, empreendido para concretizá-lo virtualmente conforme requisitos especificados, incluindo limitações de tempo, custo e recursos. O projeto de MEMS segue os princípios da divisão do sistema em partes e o controle do sistema e suas partes, ambos estabelecidos pela TGS (Teoria Geral dos Sistemas) e pela Cibernética (RUYER, 1972), o que sugere quatro níveis de projeto virtual (BERTALANFFY, 1968):

- Sistema é um conjunto de subsistemas interligados e inter-relacionados por junções de modo que haja causa e efeito nas transformações que se manifestam através dele e onde a energia é nula, ou então, a energia gerada é igual à energia convertida e dissipada.
- Subsistema é um conjunto de dispositivos diferentes com atributos e funções especiais que podem interagir entre eles e com o ambiente externo de forma organizada (naturalmente ou por meios artificiais).
- Dispositivos são elementos que armazenam, transmitem, convertem e dissipam energia. Seu comportamento pode ser definido através de informação em relação a dois pontos no espaço e num determinado intervalo de tempo.
- Processo são conjuntos de ações que focam a transformação, modificação e conformação no aproveitamento das propriedades dos materiais e insumos para a fabricação de dispositivos, subsistemas e sistemas satisfazendo requisitos impostos em cada nível.

A execução das atividades segue uma das duas metodologias: *top-down* e *bottom-up*. A metodologia *top-down* se desenvolve a partir dos parâmetros comportamentais impostos em nível de sistema, de forma que as especificações são utilizadas para obter o desempenho desejado do subsistema. Entretanto, a metodologia *bottom-up* se realiza a partir do nível hierárquico mais baixo, tentando encapsular o comportamento num macromodelo no nível hierárquico mais elevado, conforme ilustrado na Figura 2.13 (DEL TIN, 2007).

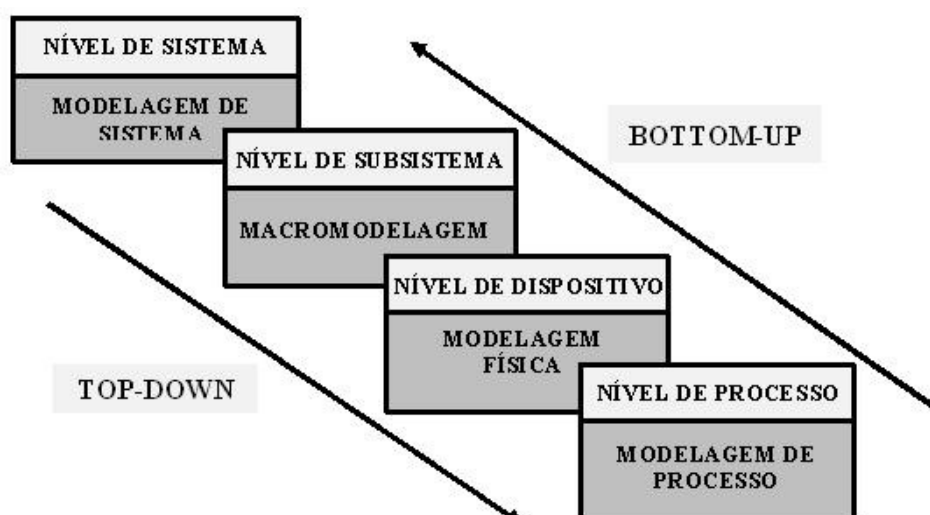


Figura 2.13: Etapas da metodologia de projeto.

Na área de MEMS, dois grupos de estudo em trabalhos de pesquisa científica são perfeitamente identificados. O primeiro foca estudos na introdução de novos projetos. Geralmente os métodos que são utilizados por esse grupo, para análise e

predição do comportamento dos MEMS, são emprestados daqueles usados nos dispositivos convencionais. O segundo grupo foca na modelagem, simulação e na predição do comportamento estático e dinâmico desses dispositivos. No entanto, não levam em conta as tecnologias de construção, logo os modelos e métodos de análise e predição do comportamento são gerados, introduzidos e discutidos pelo próprio grupo (LIN, 2006).

A interação com os diferentes níveis de projeto é critério do projetista e sua especialidade. A fim de reduzir o tempo necessário para completar o projeto, conforme ilustrado na Figura 2.13, muitos esforços são direcionados para aperfeiçoar os métodos e as ferramentas de modelagem, simulação e verificação para cada um dos níveis (SENTURIA, 1992), (MASEEH, 1990).

2.4.1 Modelagem Matemática

Modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda a forma de desenvolver e elaborar representações ou interpretações simplificadas da realidade através de equações ou fórmulas (modelo), e prima por obter aquele que melhor imite o comportamento e as características observadas. Entretanto, o modelo concebido não descreve por completo esse comportamento. Dois tipos de modelagem matemática se destacam: modelagem analítica e modelagem numérica.

A modelagem analítica, em nível de processo, é uma atividade altamente sofisticada, e num primeiro instante não será abordada neste trabalho. Entretanto, a modelagem física foca especificamente o comportamento tridimensional, contínuo e real dos dispositivos quando submetidos a determinados esforços e ambientes característicos. Os modelos matemáticos neste nível são governados por equações diferenciais parciais (PDEs – *Partial Differential Equations*), as quais apresentam o modelo comportamental difícil de ser interpretado e analisado pelo projetista de MEMS. A modelagem analítica, desenvolvida em nível de subsistemas, utiliza-se de equações diferenciais ordinárias (ODEs - *Ordinary Differential Equations*), de forma que estas devam capturar a informação contida nas PDEs. Estes modelos podem ser representados de forma literal ou graficamente. Entre as representações estão os gráficos de função, diagramas de blocos, diagramas de fluxo de sinal e diagramas de ligação (ver Figura 2.14).

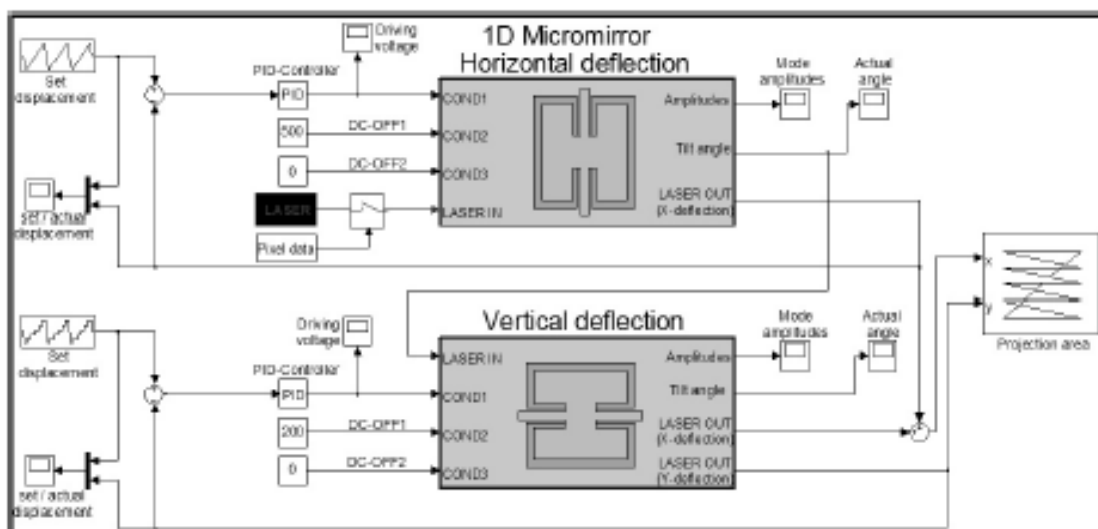


Figura 2.14: Modelagem matemática: nível de sistema (FEDDER, 1999).

Em macromodelagem um subsistema pode ser representado por um único bloco. Em nível de sistema a modelagem se auxilia da álgebra de diagramas em bloco onde cada bloco etiquetado representa um subsistema, e as linhas como as setas entre os blocos indicam os caminhos e as relações entre os mesmos. O diagrama de blocos é um esquema genérico que mostra as partes que integram o sistema e o modo como este funciona, de maneira que o diagrama é a representação do sistema. Por outro lado, tanto em nível de subsistema e de sistema existem limitações quanto à utilização dos métodos analíticos.

Também, os problemas de modelagem de MEMS se beneficiam de técnicas numéricas. A modelagem numérica converte soluções analíticas em soluções algébricas. Embora demandem trabalho, resolvem o modelo analítico e são significativas quando o modelo analítico possui considerável número de variáveis. Por outro lado, também, os métodos numéricos permitem solucionar equações diferenciais em qualquer distribuição espacial, principalmente quando as propriedades dos materiais variam ou a geometria sofre alteração com o tempo (SENTURIA, 1992).

Entre os métodos estudados na modelagem numérica e que são direcionados à solução de problemas típicos da modelagem em nível físico de MEMS estão: Métodos dos Elementos Finitos, Método dos Volumes Finitos, Métodos das Diferenças Finitas, e Parâmetros Concentrados (CALIS, 2008). No nível de subsistema podem ser usados os métodos numéricos como: Método de Euler, Séries de Taylor, Método de Range-Kutta, métodos de passo simples, e outros (HIEKE, 1999).

2.4.2 Simulação e Verificação

A integração do computador no projeto de MEMS propicia a modelagem computacional, a qual investiga a forma de desenvolver os modelos analíticos e numéricos através do computador e apresenta a solução a estes, utilizando gráficos, visualização e imagem com o objetivo de facilitar a interpretação. A simulação e a verificação permitem a vistoria do MEMS através dos quatro níveis de projeto utilizando ferramentas computacionais (ver Figura 2.13).

O nível de processo utiliza ferramentas computacionais denominadas por TCAD (*Technologies CAD*). O nível de dispositivo visa ao comportamento tridimensional, contínuo e real do MEMS quando submetido a esforços e ambientes característicos. A simulação e a verificação em nível de subsistema e de sistema se apresentam em forma de gráficos e blocos. A aplicação de sinais de entrada e saída pode ser através de animação gráfica.

A modelagem computacional de MEMS - simulação ou verificação - é uma tarefa complexa. Estas envolvem acoplamento de múltiplos domínios da energia, estruturas geométricas complexas, modelos de várias funções base e ordem elevada e discretização no tempo e no espaço. Os níveis de subsistema, como de sistema, visam ao uso de modelagem compacta, o que exige a redução da ordem e o número de funções base do modelo.

2.4.2.1 Discretização

Cabe resgatar que discretização se aplica tanto ao espaço como ao tempo. A discretização de PDE conduz a um sistema de equações diferenciais ordinárias que permite análise estática, modal, harmônica e transitória. Este processo produz um espaço discreto e finito de pontos, o que torna o problema físico mais complexo. Os processos implícitos de discretização recaem em sistemas de equações algébricas

lineares, onde o número de equações é proporcional ao número de pontos. A resolução desses sistemas caracteriza-se por buscar a solução de ‘n’ equações com ‘n’ incógnitas, sendo este um dos problemas da computação científica. Computadores modernos são capazes de gerir essa demanda, entretanto, se o número de pontos aumenta drasticamente exige computação de alto desempenho e, conseqüentemente, algoritmos paralelos para sua resolução. O que reivindica novas soluções em ambientes paralelos de computação e a verificação de seus benefícios (CANAL, 1999).

Na simulação de uma estrutura tridimensional MEMS, quando discretizada, constata-se que não somente os pontos do interior, como também os pontos do exterior têm que ser computados. Isso representa essencialmente dois problemas: a criação da malha adequada e o truncamento do domínio convertendo-o em finito. A eficiência das simulações em acoplamentos pode ser melhorada utilizando-se a solução mais rápida e disponível para a ligação eficaz entre os mesmos. Entre as primeiras abordagens está o método Langrangiano e uma segunda abordagem é atualização do mesmo (DE, 2004).

Os métodos para abordagem específica de campos eletromecânicos são baseados no uso de técnicas seqüenciais e acoplamento completo. Outras abordagens utilizadas com ferramentas computacionais são circuitos concentrados e elementos transdutores. O primeiro tipo é utilizado com outros circuitos simples, de forma que o conjunto permita realizar simulação. O segundo tipo é um elemento de ligação direta entre duas energias de forma diferente, denominado de transdutor.

Outro método utilizado é o método do relaxamento, o qual consiste em usar *solvers* específicos ao domínio de energia, sendo executado de forma seqüencial. Cada um atualiza o valor das variáveis associadas, e passa os resultados para os seguintes *solvers* até que a convergência seja alcançada. A idéia fundamental é que cada ferramenta computacional use métodos diferentes de forma a diminuir a complexidade durante a simulação e a verificação.

2.4.2.2 Modelagem Compacta

Outra possibilidade para a redução de complexidade na simulação de MEMS é a modelagem compacta. Esta é fundamental para os níveis de subsistema e sistema. O termo modelagem compacta aborda as técnicas que podem ser utilizadas para obter o modelo cuja composição apresente o menor número de funções-base e a menor ordem (ver Figura 2.15).

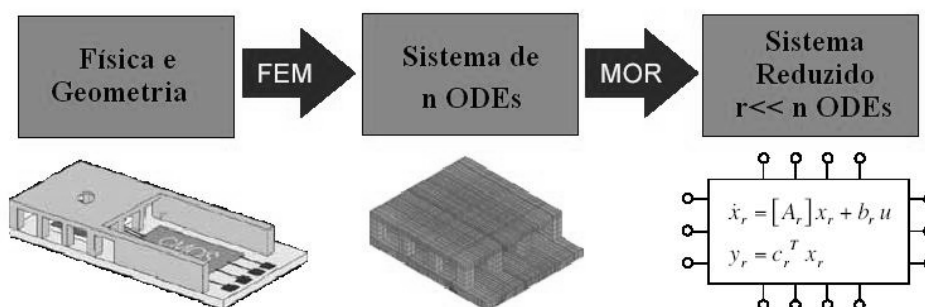


Figura 2.15: Modelagem compacta de MEMS.

O macromodelo otimizado e convertido num modelo compacto se caracteriza por delinear com precisão o comportamento, tanto estático quanto dinâmico, descrever completamente o dispositivo, ser uma ferramenta eficaz e eficiente, permitir simulação

rápida e ter forma simples e geral. O conceito de modelagem compacta não é novo. Diversas abordagens de modelagem compacta têm sido propostas e várias ferramentas estão disponíveis para simulação em diferentes níveis. As primeiras abordagens introduzidas vieram emprestadas da microeletrônica ou do mundo mecânico (HUNG, 1997), (TILMANS, 1996).

O potencial dos métodos para redução da ordem do modelo (MOR - *Model Order Reduction*) em MEMS é extremamente promissor. A matemática MOR não está diretamente relacionada à criação de um dispositivo modelo (conforme Figura 2.15), porém sua aplicação permite a extração de um sistema de ODEs de menor ordem que reproduz o comportamento de entrada/saída do MEMS com boa precisão. O método é baseado em propriedades matemáticas do sistema original e, portanto, é formal, sólido e, em grande parte, automático. Pouco conhecimento do mecanismo de redução é necessário para uso (RUDNYI, 2006). A partir de uma visão computacional, a vantagem de ferramentas computacionais como ANSYS[®] está no MOR, pois este permite observar o comportamento em regime transitório e regime permanente, linearidade e não linearidade entre os sinais de entrada e de saída. Isto tem diminuído o tempo de processamento na aplicação.

2.5 Produção

A produção de MEMS implica três etapas: fabricação, encapsulamento e testes. A etapa de encapsulamento não é abordada neste trabalho. Entretanto, não quer dizer que não possa se beneficiar dos resultados obtidos neste trabalho. Logo, num primeiro momento, o interesse está focado na fabricação e nos testes.

2.5.1 Fabricação

As técnicas de fabricação de MEMS se dividem em dois grupos: processos específicos e processos compatíveis com a microeletrônica. No primeiro grupo cabe citar o processo LIGA (acrônimo alemão para *lithography, plating, and moulding*) e o SCREAM (*Single Crystal Reactive Etching and Metallization Process*) (EHRFELD, 1998), (SHAW, 1994). Entretanto, as técnicas compatíveis com os processos de fabricação de circuitos integrados (microeletrônica), por sua vez, podem ser classificadas segundo as regiões ou camadas que são removidas (corroídas) para a liberação de estruturas suspensas. Assim, podem ser classificadas em remoção do substrato pela face anterior ou posterior (*front/back-side bulk micromachining*) e remoção de camadas sacrificiais da superfície do substrato (*surface micromachining*), como mostra a Figura 2.16 (RIBAS, 2000).

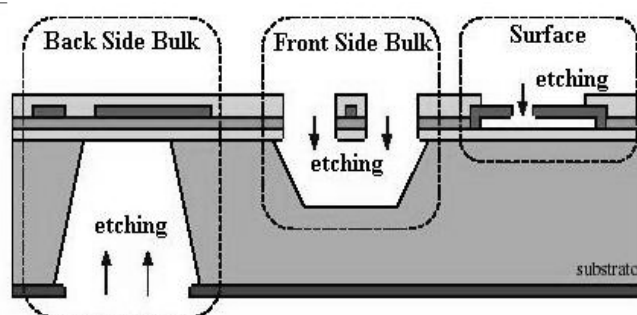


Figura 2.16: Tipos de microusinagem para fabricação de MEMS (RIBAS, 2000).

2.5.1.1 *Microusinagem no substrato (bulk micromachining)*

Microssistemas suspensos são facilmente construídos a partir da corrosão da face anterior e/ou posterior do substrato (*front-side e back-side etching*, respectivamente). As diferenças entre essas duas técnicas de microusinagem são bastante acentuadas tanto no processo de fabricação, quanto no tipo de microssistema desejado. No caso da usinagem pela face anterior, a suspensão do microssistema deve-se ao processo de corrosão lateral (*underetching*). A técnica é eficiente em termos de custos e tempo de fabricação, assim como em relação à compatibilidade com a eletrônica. Porém, a quase inexistente liberdade de alteração das etapas do processo e das características das camadas existentes (espessura, resistividade, dopagem,...) comprometem a flexibilidade do projeto e limitam as aplicações alvejadas (TOMOVICH, 1988), (COURTOIS, 1997). A usinagem pela face posterior do substrato por sua vez é bastante utilizada para a realização de membranas. O objetivo principal é a realização de uma corrosão profunda e sem corrosão lateral significativa. Neste caso, o alinhamento da máscara posterior geralmente representa uma dificuldade, assim como o controle da profundidade de corrosão, resultando em estruturas maiores e mais grosseiras (SEIDEL, 1984).

2.5.1.2 *Micro-usinagem de superfície (surface micromachining)*

A microusinagem de superfície refere-se exatamente aos processos de construção de microssistemas suspensos, a partir da remoção ou corrosão de camadas existentes na superfície do substrato. Estas camadas podem ser tanto dielétricos quanto metais, que, quando utilizadas para tal fim, são denominadas de camadas sacrificiais. Portanto, após a fabricação do CI a camada que esteja acessível externamente pode ser removida através de um ataque seletivo. O óxido de silício e o alumínio são bastante utilizados como camadas sacrificiais em processos de silício. Uma nova tecnologia na microfabricação é o processo EFAB (*surface micromachining process*).

EFAB é baseado no método padrão Máscara Instantâneo que simplifica a fabricação de MEMS. O método consiste em colocar um isolante sobre o substrato de forma a pressionar a máscara contra o mesmo, através de orifícios no material isolante e, depois, retirar a máscara do substrato. O resultado é uma camada rápida e depositada numa única etapa. O processo é significativamente mais rápido do que fotolitografia, o que torna possível a fabricação de dispositivos MEMS com dezenas de camadas num único dia, em comparação às várias semanas de um processo convencional.

Os blocos, conforme o processo EFAB avança, ficam temporariamente embutidos, servindo de apoio mecânico à estrutura toda. Material adicional pode ser depositado ao longo de toda a camada sem constrangimento. Essa liberdade geométrica também torna possíveis monolitos discretos, que podem ser interligados com outras partes. Isso elimina a necessidade de colagem posterior. Cabe notar que esta tecnologia demora menos de 24 horas na fabricação de dispositivos para MEMS.

2.5.2 Testes

O estágio de desenvolvimento do produto como o de produção em MEMS possuem requisitos e objetivos de teste exclusivos com resultados muito diferentes. A otimização dos testes em MEMS decorre da observação das vibrações estruturais dos mesmos, de forma a satisfazer os seguintes objetivos: (a) determinar a natureza e a

extensão dos níveis de resposta às vibrações em funcionamento; (b) validar o modelo teórico e suas previsões; (c) medir as propriedades dos materiais quando submetidos a carregamento dinâmico; e (d) estimar fadiga e confiabilidade (LIN, 2006).

Existem basicamente dois tipos de teste frequentemente empregados para microestruturas: teste modal (*modal test*) e teste local (*in situ test*). Os parâmetros modais regem o comportamento dinâmico e são identificados utilizando-se os testes modais. O teste modal consiste em fazer vibrar o dispositivo sob teste através de uma excitação conhecida, e a análise experimental pretende: (a) excitar dispositivo com força conhecida; (b) medir a força de entrada e as correspondentes respostas estruturais e (c) obter os parâmetros modais exigidos a partir dos dados medidos (AGILENT TECHNOLOGIES, 2008), (LOBONTIU, 2004).

Para excitar os MEMS, dispõe-se de dois métodos. Um consiste na aplicação estímulos físicos e o outro na aplicação de sinais elétricos. A aplicação de sinal elétrico como estímulo é melhor em termos de velocidade, repetibilidade, precisão e facilidade na utilização, embora a aplicação do estímulo físico seja melhor quando o MEMS deve reproduzir seu comportamento operacional. Há dois métodos diferentes para medir o resultado dos MEMS. Um consiste em medir diretamente o deslocamento com interferômetro laser e o outro consiste em medir eletricamente usando sinais de teste. Embora as medidas diretas com interferômetro laser estejam avançadas, a medição através de sinais elétricos prevalece conforme o comentário anterior. Cabe ressaltar que as vibrações dos MEMS possuem amplitudes baixas e frequências naturais elevadas.

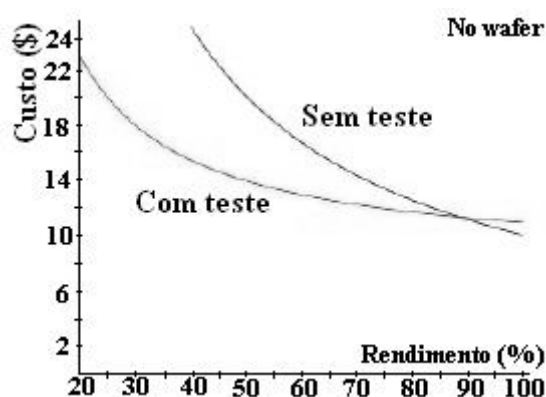


Figura 2.17: Custo *versus* rendimento dos testes para MEMS (PRESTON, 2008).

Cada uma das três fases do ciclo de vida de desenvolvimento de produto MEMS possui requisitos e objetivos de teste exclusivos com resultados muito diferentes. No caso do estágio de pesquisa e desenvolvimento do produto deve comprovar-se que o dispositivo funciona e que pode ser fabricado. Neste estágio o teste em nível de *wafer* permite a caracterização precoce do dispositivo, o que reduz o tempo em desenvolvimento e, naturalmente, os custos em até 15%. O estágio piloto de produção deve provar a capacidade de fabricação em volumes de alta produção, desenvolver uma solução de equipamento de produção e também a necessidade de testes por volume. Aqui, tempo e custos de desenvolvimento podem ser reduzidos por meio do teste no *wafer*. Por outro lado, o estágio de produção em volume maximiza o rendimento e tenta reduzir os custos. Como o rendimento normal de produção de MEMS é mais baixo que na produção de circuitos integrados e as decomposições de custo mostram que 60 a 80%

dos custos de fabricação ocorrem durante e após o encapsulamento, os testes realizados no estágio inicial permitem uma redução de custo significativo na produção em volume de MEMS (MIR, 2000).

2.5.3 Características Técnicas de Atuadores

A caracterização técnica de MEMS está atrelada a parâmetros como qualidade, desempenho, comportamento operacional, modelo, processo, material e geometria. Esses parâmetros são resultado da avaliação que os MEMS têm durante o projeto, e sua eficácia e eficiência ajudam a diminuir o custo da produção. Entretanto esses parâmetros também ajudam na comparação entre diferentes MEMS.

Os parâmetros estão vinculados a medidas características aceitas universalmente. Os parâmetros que caracterizam o desempenho dependem dos parâmetros de comportamento operacional. Os parâmetros de desempenho são definidos pela relação dos sinais de saída e de entrada: sensibilidade, ganho, linearidade, erro de saída (*offset*), deriva (*drift*), repetibilidade, histerese, resolução. Entretanto, os parâmetros de comportamento operacional são aqueles definidos pelo sinal de saída: sobre sinal máximo (*overshoot*), tempo de subida, tempo de acomodação, constante de tempo, frequência, resposta em frequência, frequência de amortecimento e o fator de amortecimento. Os parâmetros do modelo são os relacionados como as capacidades de oposição do sistema: massa, amortecimento, rigidez, resistência elétrica, capacitância indutância, entre outros. Os parâmetros do material e os geométricos são definidos por grandezas identificadas pelo seu nome. Estes são influenciados pelo processo e são de fundamental importância no projeto MEMS. Garantir todos esses parâmetros durante a fase de projeto e a verificação durante a fabricação é garantir a qualidade de cada dispositivo MEMS.

3 SÍNTESE NO PROJETO DE ATUADORES MEMS

O crescimento e o desenvolvimento de novos projetos inovadores utilizando MEMS, mostrado no capítulo 1; as aplicações de dispositivos MEMS, como é o caso específico dos dispositivos baseados em deformação elástica e força eletrostática gerada através de *comb-drive*, discutido no capítulo 2 têm manifestado a necessidade crescente de avançar nas técnicas de modelagem e simulação do seu comportamento. Este capítulo é uma contribuição científica à obtenção dos parâmetros característicos dos atuadores MEMS, que, no modelo matemático fechado de segunda ordem, descrevem o comportamento linear dos mesmos.

“Na verdade, você nunca entende uma nova teoria. Você simplesmente a utiliza.”
Albert Einstein (1879-1955)

3.1 Modelagem Matemática em Nível de Subsistema

Usar o ato de gerar informação como ferramenta para projetar e reproduzir quantitativamente o MEMS, estabelecendo as qualidades funcionais de forma que tenham um significado próprio no seu desempenho comportamental, é o objetivo do projeto. A modelagem matemática em nível de sistema, procura obter o comportamento dinâmico mais preciso, o macromodelo, tornando-o atrativo para que o projetista tenha noção da variação das grandezas geométricas, dos resultados da fabricação e do comportamento dos diferentes domínios de energia.

A formulação desses modelos obedece, primeiramente, à identificação das partes (subsistemas, dispositivos, componentes) e, posteriormente, ao detalhamento das variáveis: exógenas (parâmetros) ou endógenas (medida de desempenho). Para a construção eficaz desse modelo são necessários dados. Em geral, o sucesso da modelagem está relacionado com disponibilidade, exatidão e relevância dos dados. Por sua vez, estes manifestam sua relação através de um modelo matemático o qual tem sua origem na criação de hipóteses (FUNK, 1994).

Para trabalhar as hipóteses e estabelecer a relação entre os dados dispõe-se de vários métodos. Em alguns casos o único método disponível é empírico. Este método, entretanto, deve estar baseado em dados de dispositivos ou sistemas com os quais o projetista está familiarizado. Caso contrário, pode haver o risco de uma modelagem errônea. Porém não se pode deixar a drasticidade tomar conta, porque é um recurso usual quando os requisitos não estão disponíveis e o tempo não é suficiente para usar outro método mais sofisticado.

Outro método usado comumente é a extrapolação. Este método depende de comparações com outros componentes similares, portanto, os critérios adotados devem

ser mais profundos. Um terceiro método resume-se no cálculo matemático. Este método reúne o uso das leis fornecidas pela teoria ou experiências passadas, e é o mais usual. Existe, ainda, a medição. Este método envolve dados agrupados estaticamente. São obtidos de testes sob condições ambientais e operacionais tanto de fábrica como de laboratório (REIMBOLD, 1994).

3.1.1 Modelos Matemáticos

Existem várias formas para solucionar os modelos matemáticos. Um deles reúne os modelos em três diferentes grupos: caixa branca, caixa preta e caixa cinza.

A modelagem denominada “caixa branca” requer o conhecimento detalhado do sistema através das relações matemáticas que descrevem os fenômenos envolvidos com o mesmo. Por esse motivo, também é denominada de modelagem fenomenológica, ou modelagem pela física, ou ainda, modelagem conceitual.

A modelagem “caixa preta” objetiva investigar as alternativas que possam substituir a modelagem “caixa branca” e que utilizam pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema para a modelagem. Por esse motivo, também, é denominada de modelagem empírica.

Os métodos do grupo “caixa cinza”, como são denominados, se caracterizam pelo uso de informação auxiliar, a qual não se encontra no conjunto de dados utilizados durante a modelagem “caixa preta”. O tipo de informação auxiliar e a intensidade com que ela é usada variam entre os diversos métodos disponíveis para a “caixa cinza”, o que permite qualificá-los como métodos claros e métodos escuros (LJUNG, 1996). A identificação “caixa-cinza” é uma área bastante ampla e por se tratar de um assunto relativamente novo muitos dos problemas estão praticamente em aberto (CORRÊA, 2004).

3.1.2 Modelos Dinâmicos

Todos os sistemas reagem à aplicação de forças tanto, de forma dinâmica como estática. Modelos estáticos são normalmente descritos por equações algébricas, e apresentam um valor constante na variável de saída para cada valor constante que tenha a variável de entrada. Entretanto, em última análise, todo sistema real apresenta características dinâmicas, mas se não for relevante, este pode ser representado por um modelo estático. As áreas tecnológicas e científicas primam por modelos dinâmicos que descrevem processos dominados pela mecânica, pois são extremamente importantes na análise e no planejamento da operação dos sistemas.

Os modelos dinâmicos podem ser classificados quanto aos seguintes aspectos: mensuração, parâmetros característicos, formato da resposta, número de entradas e saídas, conexões externas entre entrada e saída, entre outras. Essa classificação também decorre da alteração que o comportamento do sistema sofre sob a influência de interferência ou/e ruído que alteram: material, geometria, posição espacial e vida útil. Tais alterações são detectadas e delatadas pelo comportamento dos parâmetros característicos. Dessa forma, os modelos obedecem à seguinte classificação: (AGUIRRE, 2004):

- *Modelo de Parâmetros Distribuídos e Modelo de Parâmetros Concentrados*

É qualquer modelo cujos parâmetros variam conforme o tempo ‘t’ e/ou a posição espacial (x,y,z). Se os parâmetros mudam conforme a variação dessas coordenadas, o modelo é denominado de “modelo de parâmetros

distribuídos”, e sua representação é um conjunto de equações diferenciais parciais (PDEs - *Partial Differential Equations*). Por outro lado, diz-se que um modelo é de “parâmetros concentrados” quando seu comportamento varia unicamente em função do tempo, sendo seus parâmetros constantes e sua representação resulta num conjunto de equações diferenciais ordinárias (ODE – *Ordinary Differential Equations*).

- *Modelos Paramétricos e Modelos Não-Paramétricos*

O “modelo paramétrico” é aquele que relaciona a entrada e a saída do sistema, através da operacionalidade de um conjunto de parâmetros, os quais são expressos através de números ou coeficientes. Os modelos não-paramétricos para estabelecer essa relação se utilizam de gráficos ou tabelas, os quais representam a resposta ao impulso e a resposta em frequência.

- *Modelos Determinísticos e Modelos Estocásticos*

Os “modelos determinísticos” são aqueles que possuem certeza nos dados de seu comportamento, ou seja, em instantes de tempo ‘t’, passado ou presente, somente há a correspondência de um único valor ou quantidade. Entretanto, os “modelos estocásticos” possuem certo grau de incerteza, ou seja, sua saída no instante ‘t’ não pode ser exatamente conforme dados referentes ao passado.

- *Modelos Contínuos e Modelos Discretos*

Os modelos contínuos apresentam evolução contínua em todos os instantes de tempo, mas os modelos discretos são aqueles que envolvem dados em determinados intervalos de tempo, caracterizando-se por não terem continuidade no tempo.

3.1.3 Propriedades dos Modelos

Os modelos obtidos a partir dos dados apresentam características, umas mais acentuadas que outras, provocando a diferenciação entre os mesmos. Logo essas características são causalidade, memorização, inversibilidade, invariância no tempo, linearidade e estabilidade. A causalidade é a capacidade de responder às excitações em tempo presente e passado. A memorização é a capacidade de reter a resposta por um intervalo de tempo. A inversibilidade pode ser definida como a capacidade de identificar a excitação a partir da resposta. Por outro lado, a invariância no tempo consiste na “não-mudança”, ou seja, é a capacidade de imutabilidade. A linearidade é capacidade das respostas obedecerem à proporcionalidade constante com que muda a excitação. E finalmente, a estabilidade é a capacidade de responder convergindo para um valor finito.

3.2 Modelo Linear em Tempo Contínuo e Discreto

O modelo analítico clássico que descreve o comportamento dos atuadores MEMS eletrostáticos é representado pelo diagrama em blocos da Figura 3.1

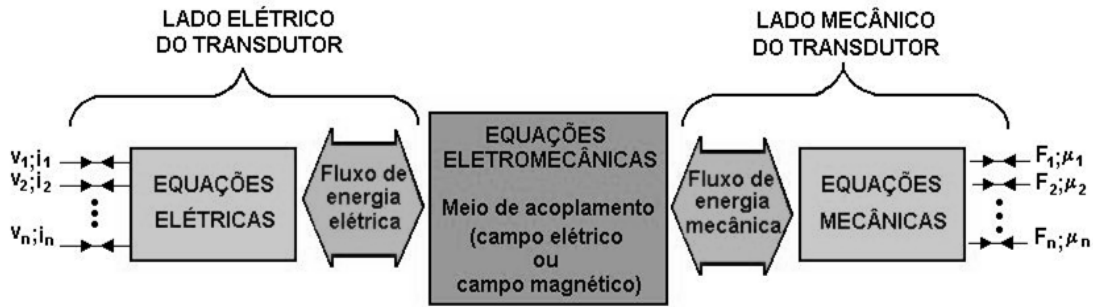


Figura 3.1: Concepção do modelo analítico de atuadores eletrostáticos MEMS.

Os três blocos da Figura 3.1 representam as três equações embarcadas no próprio modelo, de forma que uma descreve o comportamento elétrico, outra mostra o desempenho mecânico, e a terceira faz o acoplamento entre as duas primeiras, ou, entre as diferentes formas de energia. A relação estabelecida entre fluxos de energia, elétrico e mecânico da Figura 3.1, também, é representada através de um diagrama de corpo livre, resultado da aplicação da Segunda Lei de Newton (conforme Figura 3.2).

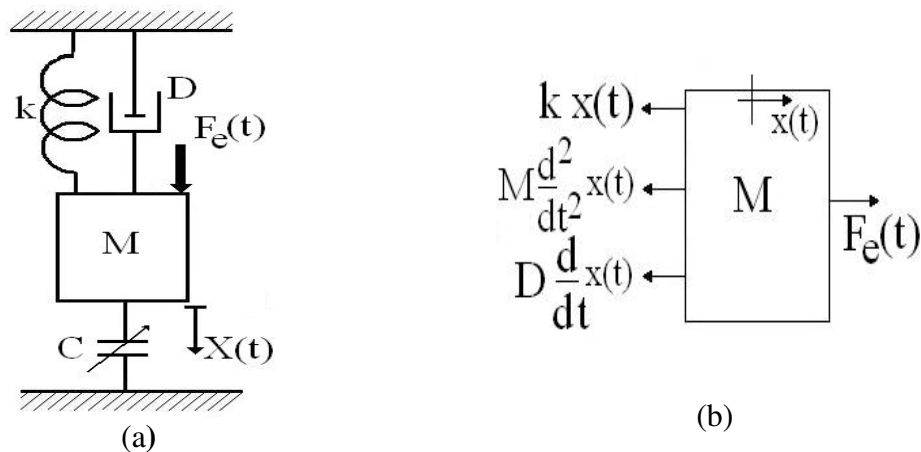


Figura 3.2: Atuador eletrostático MEMS (a) parâmetros concentrados, (b) corpo livre.

A Figura 3.2 mostra que o comportamento mecânico é descrito pela inércia do corpo ‘M’, o amortecimento ‘D’ e a rigidez ‘k’ da estrutura, à qual é aplicada a força de índole eletrostática, portanto, o modelo analítico que decorre da análise de corpo livre é uma ODE de segundo grau, não homogênea, linear e invariante no tempo (LTI – *Linear Invariant Time*) (OGATA, 1993), como define a expressão (3.1) para o tempo contínuo e para o tempo discreto o modelo é definido através da expressão (3.2), onde ‘i’ são os instantes de tempo e ‘Δi’ são os intervalos.

$$M \frac{d^2}{dt^2} x(t) + D \frac{d}{dt} x(t) + k x(t) = F_e(t) \square \quad (3.1)$$

$$M \frac{\nabla^2}{\Delta i^2} X[i] + D \frac{\nabla}{\Delta i} X[i] + k X[i] = F_e[i] \square \quad (3.2)$$

A solução desse modelo é feita através do método clássico de Heaveside (ZILL, 2001) que permite obter a solução geral, sendo que a solução particular é obtida através de métodos como variação de parâmetros, coeficientes indeterminados e o método abreviado. Através dessa solução pode-se obter a frequência natural de vibração ‘ f_n ’ e a frequência natural com amortecimento ‘ f_d ’ definidas através das expressões (3.3) e (3.4).

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (3.3)$$

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M} - \frac{D^2}{4M^2}} \quad (3.4)$$

Examinando a expressão (3.4) decorre que se o coeficiente de amortecimento ‘ D ’ é muito menor que ‘ $2\sqrt{kM}$ ’, a frequência amortecida ‘ f_d ’ é praticamente a frequência natural de vibração ‘ f_n ’ descrita na expressão (3.3), o que justifica não considerá-la no modelo. A determinação dos parâmetros característicos é fundamental para estabelecer o comportamento dos atuadores eletrostáticos, além de permitir a comparação com os desempenhos de outros atuadores.

3.3 Modelagem Estocástica

Os métodos determinísticos não dão nenhum tratamento especial ao ruído presente em dados, ainda que se aceite o fato de que os dados estejam contaminados. Logo esses métodos somente apresentam bons resultados quando a relação sinal/ruído é suficientemente alta. Por outro lado, os métodos estocásticos se utilizam de recursos adequados para levar em consideração o ruído e, dessa forma, reduzir seus efeitos sobre o próprio modelo. A gama de combinações de métodos é grande, e é possível classificar as técnicas de formas diferentes, o que justificado adequadamente pode-se converter na solução de um problema (KUMAR, 1997).

Existem vários modelos discretos utilizados em modelagem estocástica que podem representar o sistema contínuo. Cabe considerar que o sistema e o modelo devem ser submetidos às mesmas condições. Considerando o modelo geral (3.5), outros modelos podem ser deduzidos:

$$X(i) = \sum_{i=1}^{\infty} g(i) F(i) \quad (3.5)$$

onde ‘ $g(i)$ ’ é a resposta ao impulso do sistema e ‘ $F(i)$ ’ é o sinal de entrada (LJUNG, 1987). Usando-se o operador de atraso unitário ‘ q^{-1} ’ na equação (3.6), esta pode ser reescrita de forma compacta:

$$X(i) = \sum_{i=1}^{\infty} g(i) (q^{-i}f(i)) \quad (3.6)$$

ou re-escrita como:

$$X(i) = \left[\sum_{i=1}^{\infty} g(i)q^{-i} \right] F(i) = G(q)F(i) \quad (3.7)$$

onde ‘G(q)’ é denominada “função de transferência do sistema”. Introduzindo-se na equação (3.8) uma perturbação ou ruído aditivo, obtém-se:

$$X(i) = G(q)F(i) + H(q)e(i) \quad (3.8)$$

de forma que:

$$H(q) = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} h(i) q^{-i} \quad (3.9)$$

onde ‘e(i)’ representa uma seqüência de variáveis aleatórias com média zero, ‘H(q)’ é a função de transferência do ruído e ‘q’ é o operador de deslocamento unitário, definido conforme a equação (3.10):

$$q^1 F(i) = F(i+1) \quad q^{-1}F(i) = F(i-1) \quad (3.10)$$

Uma relação simples entre entrada e saída é obtida descrevendo-se a equação (3.8) como uma equação linear de diferenças, conforme a equação (3.11):

$$X(i) + a_1X(i-1) + \dots + a_nX(i-n) = b_1F(i-1) + \dots + b_mF(i-m) + e(i) \quad (3.11)$$

de forma que o termo ‘e(i)’ representa um ruído branco adicionado à equação de diferenças, tornando o modelo conhecido como “modelo de erro na equação”. A expressão (3.9) é re-escrita usando-se o operador de deslocamento:

$$X(i) = G(q,\theta)F(i) + H(q,\theta)e(i) \quad (3.12)$$

logo:

$$G(q,\theta) = \frac{B(q)}{A(q)} \quad e \quad H(q,\theta) = \frac{1}{A(q)}$$

$$\theta = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n \quad b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_m]^T$$

sendo ‘ θ ’ o vetor de parâmetros da função de transferência. Conforme o exposto, a estrutura geral dos modelos discretos lineares obedece à equação (3.13):

$$A(q)X(i) = \frac{B(q)}{F(q)}F(i) + \frac{C(q)}{D(q)}e(i) \quad (3.13)$$

Considerando-se que os polinômios $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$, $D(q)$ e $F(q)$; definidos como:

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}$$

$$B(q) = b_1q^{-1} + \dots + b_mq^{-m}$$

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_pq^p$$

$$D(q) = 1 + d_1q^{-1} + \dots + d_rq^r$$

$$F(q) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_zq^z$$

Pode-se dispor dos diferentes modelos discretos lineares apresentados na Tabela 3.1, cuja forma estrutural depende de os polinômios na expressão (3.13) serem iguais a um (1).

Tabela 3.1: Modelos discretos utilizados em identificação de sistemas (AGUIRRE, 2004).

Polinômios no Modelo Geral	Nome do Modelo
$B(q)$	FIR (Resposta ao impulso finito)
$A(q)$	AR (Auto Regressivo)
$A(q)B(q)$	ARX (Auto Regressivo de Entradas Exógenas)
$A(q)B(q)D(q)$	ARARX (Ruído Auto Regressivo num modelo Auto Regressivo de Entradas Exógenas)
$A(q)C(q)$	ARMA (Auto Regressivo de Média Móvel)
$A(q)B(q)C(q)$	ARMAX (Auto Regressivo de Média Móvel com Entradas Exógenas)
$A(q)B(q)C(q)D(q)$	ARARMAX (Ruído Auto Regressivo num modelo Auto Regressivo de Entradas Exógenas)
$B(q)F(q)$	OE (Erro na saída)
$B(q)F(q)C(q)D(q)$	BJ (Caixa de Jenkins)

3.3.1 Estimadores de Parâmetros de Modelos Discretos

Algumas representações matemáticas são adequadas para solução do modelo discreto de sistemas, e se utilizam de algoritmos conhecidos para estimar seus parâmetros. Um estimador do ponto de vista teórico é uma variável aleatória, mas do ponto de vista operacional, um estimador é uma função associada a um subconjunto qualquer de valores (amostras), um número, denominado de “estimativa”. Considerando-se que na estimação paramétrica, a saída ‘ $\hat{X}(i)$ ’ é função linear do vetor

de parâmetros ‘ $\hat{\theta}$ ’ e do vetor de regressores ‘ φ^T ’, essa pode ser escrita conforme a equação (3.14):

$$\widehat{X}(i) = \varphi^T(i)\hat{\theta} \quad (3.14)$$

O erro de predição ou resíduo é a diferença entre, a saída real diretamente medida do sistema ‘ $\widehat{X}(i)$ ’ e o valor estimado ou predito pelo modelo ‘ $X(i)$ ’ para o mesmo instante ‘ i ’, podendo ser expresso por:

$$\varepsilon = X(i) - \widehat{X}(i) \quad (3.15)$$

Um bom modelo apresenta os menores valores de erro de predição. Por isso os métodos que minimizam o erro entre as saídas reais e estimadas são chamados de “métodos para estimação por erro de predição” (LJUNG, 1996). Assim, pode-se dizer que os métodos de estimação paramétrica varrem os dados do sistema todo, sempre e quando apresentam a mesma estrutura.

3.3.2 Estimador Recursivo dos Mínimos Quadrados (RLS *Recursive Least Square*)

Este método consiste na determinação dos parâmetros característicos do modelo matemático, de tal forma que a soma quadrática das diferenças entre os dados observados e calculados, multiplicada por fatores que meçam o grau de precisão seja mínima. O estimador recursivo dos Mínimos Quadrados contorna a inversão matricial após o somatório, e também evita a repetição de cálculos para cada novo dado, exigindo menos tempo de processamento computacional (AGUIRRE, 2004). Dada a sua simplicidade, este método e suas extensões são utilizados amplamente na identificação de sistemas.

Para encontrar os parâmetros característicos contidos em ‘ $\hat{\theta}$ ’ através do estimador recursivo dos Mínimos Quadrados tem que ser deduzida a matriz de ganho ‘ L_i ’ e a matriz de covariância ‘ P_i ’ do vetor dos parâmetros a serem estimados. O ponto de partida dos algoritmos recursivos para a solução da expressão (3.14) obedece à expressão (3.16):

$$\widehat{X}(i) = \varphi^T(i-1)\hat{\theta} \quad (3.16)$$

a qual pode ser re-escrita da seguinte forma:

$$\hat{\theta}_{MQ} = \left[\sum_{i=1}^K \varphi(i-1)\varphi^T(i-1) \right]^{-1} \left[\sum_{i=1}^K \varphi(i-1)X(i) \right] \quad (3.17)$$

A partir daqui outra notação será usada:

$$P_i = \left[\sum_{i=1}^K \varphi(i-1)\varphi^T(i-1) \right]^{-1} \quad P_i^{-1} = P_{i-1}^{-1} + \varphi(i-1)\varphi^T(i-1) \quad (3.18)$$

Obedecer aos princípios de algoritmos recursivos implica expressar as grandezas num determinado instante 'i' em função de valores em instantes passados. Portanto, substituindo a expressão (3.18) na (3.17) resulta em:

$$\hat{\theta}_i = P_i \left[\sum_{i=1}^K \varphi(i-1)X(i) \right] \quad (3.19)$$

Escrevendo-se (3.17) para o instante 'i-1', obtém-se:

$$\left[\sum_{i=1}^{K-1} \varphi(i-1)\varphi^T(i-1) \right] \hat{\theta}_{i-1} = \left[\sum_{i=1}^K \varphi(i-1)X(i) \right] \quad (3.20)$$

De maneira que o lado esquerdo da expressão pode ser escrito em forma compacta como sendo ' $P_{i-1}^{-1}\hat{\theta}_{i-1}$ '. Substituindo esse resultado na expressão (3.19) chega-se a:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_i &= P_i [P_{i-1}^{-1}\hat{\theta}_{i-1} + \varphi(i-1)x(i)] \\ &= P_i [P_{i-1}^{-1} - \varphi(i-1)\varphi^T(i-1)]\hat{\theta}_{i-1} + \varphi(i-1)x(i) \\ &= \varphi_{i-1} - P_i\varphi(i-1)\varphi^T(i-1)\hat{\theta}_{i-1} + P_i\varphi(i-1)x(i) \\ &= \varphi_{i-1} + P_i\varphi(i-1)[x(i) - \varphi^T(i-1)\hat{\theta}_{i-1}] \\ &= \hat{\theta}_{i-1} + L_i \eta(i) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Sendo $L_i = P_i\varphi(i-1)$ uma matriz de ganho determinada a partir da covariância da rotina de atualização recursiva; e $\eta(i) = x(i) - \varphi^T(i-1)\hat{\theta}_{i-1}$ a inovação no instante 'i'. Considerando, também, que P_i é a matriz de covariância do vetor dos parâmetros a ser estimada, esta é obtida de forma a não ter que fazer uma inversão da mesma em cada interação do algoritmo conforme a seguinte expressão:

$$P_i = P_{i-1} - P_{i-1}^{-1}\varphi(i-1)(\varphi^T(i-1)P_{i-1}\varphi(i-1) + 1)^{-1}\varphi^T(i-1)P_{i-1} \quad (3.22)$$

Finalmente, da expressão (3.21) obtém-se a seguinte matriz-ganho:

$$L_i = \frac{P_{i-1}\varphi(i-1)}{\varphi^T(i-1)P_{i-1}\varphi(i-1) + 1} \quad (3.23)$$

3.3.3 Estimador Recursivo Variável Instrumental (RIV *Recursive Instrumental Variable*)

A estimativa resultante dos mínimos quadrados não inclui unicamente os parâmetros característicos do sistema, mas também o modelo do ruído. Este resultado torna difícil identificar a parcela que própria do sistema daquela que corresponde à

dinâmica da perturbação. Para melhorar as estimativas, neste caso, utiliza-se o *método das Variáveis Instrumentais (IV-Instrumental Variables)* (CHUA, 2002). Este consiste em encontrar um vetor ‘ $\zeta(i)$ ’, conhecido como “vetor instrumental”, de forma a tornar predominantes os parâmetros na estimação e sua convergência. Assim,

$$X(i) = \varphi^T(i)\hat{\theta}_o + v_o(i) \quad (3.24)$$

sendo ‘ θ_o ’ o vetor de parâmetros reais do sistema e um certo sinal ‘ $v_o(i)$ ’ associado aos ruídos e imperfeições no sistema. E substituindo (3.24) na expressão (3.17), tem-se que o vetor dos parâmetros é dado por:

$$\hat{\theta} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \zeta(i)\varphi^T(i) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \zeta(i)[\varphi^T(i)\hat{\theta}_o + v_o(i)] \quad (3.25)$$

A qual pode ser re-escrita da seguinte forma:

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}_o + \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \zeta(i)\varphi^T(i) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \zeta(i)v_o(i) \quad (3.26)$$

Para que ‘ $\hat{\theta}$ ’ convirja para ‘ $\hat{\theta}_o$ ’ com um valor grande de ‘ N ’, primeiro deve existir:

$$\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \zeta(i)\varphi^T(i) \right]^{-1} \quad (3.27)$$

e depois,

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \zeta(i)v_o(i) \quad (3.28)$$

devem tender a zero.

Para que o método seja aplicado com sucesso no sistema (3.24), a variável instrumental deve estar condicionada às seguintes propriedades:

$$\bar{E} [\zeta(i)\varphi^T(i)] \quad (3.29)$$

deve ser singular.

$$\bar{E}\{\zeta(i)v_o(i)\} = 0 \quad (3.30)$$

Para que ' $\hat{\theta}$ ' tenda a ' $\hat{\theta}_0$ '.

Em outras palavras, deve-se ter correlação entre ' $\zeta(i)$ ' e ' $\varphi(i)$ ', mas não correlação entre ' $\zeta(i)$ ' e ' $v_o(i)$ '. Para garantir que as propriedades (3.29) e (3.30) sejam atendidas e o vetor de instrumentos ' $\zeta(i)$ ' não seja influenciado por ' $v_o(i)$ ' pode-se gerar o vetor da seguinte forma:

$$\zeta(i) = \kappa(q)[-X(i-1) \quad -X(i-2) \quad \dots \quad -X(i-n_a) \quad F(i-1) \quad \dots \quad F(i-n_b)]^T \quad (3.31)$$

em que ' $\kappa(q)$ ' é um filtro linear e ' $X(i)$ ' é gerado a partir do sinal de entrada ' $F(i)$ ' do sistema:

$$N(q) X(i) = M(q) F(i) \quad (3.32)$$

com:

$$N(q) = 1 + n_1 q^{-1} + \dots + n_{nn} q^{-nn} \quad (3.33)$$

$$M(q) = m_0 + m_1 q^{-1} + \dots + m_{nm} q^{-nm} \quad (3.34)$$

Se a entrada do sistema é gerada em malha aberta de forma que não depende do ruído ' $v_o(i)$ ', então a propriedade (3.30) é atendida. E, desde que o vetor ' $\varphi(i)$ ' e o vetor ' $\zeta(i)$ ' foram gerados da mesma seqüência da entrada, então a condição (3.29) é satisfeita (LJUNG, 1987). Uma forma prática para construir o vetor de instrumentos é utilizar o modelo obtido da estimação pelo método dos mínimos quadrados para ' $N(q)$ ' e ' $M(q)$ '. Os instrumentos são então escolhidos como em (3.31), com $\kappa(q) = 1$.

3.4 Identificação de Sistemas

A modelagem empírica conhecida por modelagem "caixa preta", ou identificação requer pouco conhecimento do funcionamento interno do sistema. A análise se baseia no estudo dos dados obtidos através da observação do sistema. Toda a informação, *a priori*, que se tem do sistema é considerada, e isto torna o esforço de projeto e o tempo de processamento fácil e rápido. A identificação de sistemas visa a encontrar o modelo matemático que melhor represente a relação entre dados amostrados do sinal de entrada ' $F(i)$ ' e do sinal de saída ' $X(i)$ ', como ilustrado na Figura 3.3.

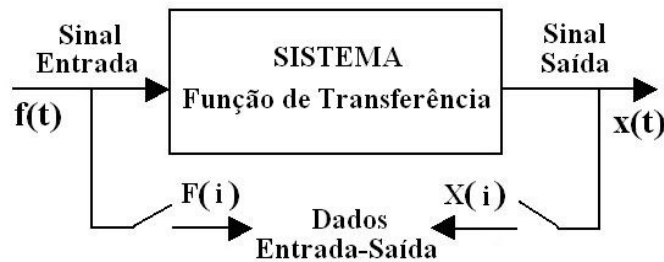


Figura 3.3: Processo de identificação de sistemas.

Os métodos de identificação são divididos, quanto à obtenção de dados, em métodos *on-line* e métodos *off-line*. A identificação *on-line* é um procedimento interativo via computador, o que exige dos métodos que utilizem pouca memória e sejam capazes de atualizar a estimação dos parâmetros do modelo a cada período de amostragem. Diversos algoritmos estão disponíveis na literatura para realizar a estimação *on-line*. Na identificação *off-line*, com o auxílio de sinais de teste apropriados de entrada (ruído branco ou sequência binária pseudo-aleatória), excita-se o sistema e armazenam-se as medidas de entrada e saída para aplicação e avaliação posterior com algoritmos de estimação recursiva. A identificação *off-line* apresenta desvantagem quanto à quantidade de memória necessária para armazenar os valores das amostras de entrada e saída do sistema.

Garantir o sucesso da identificação consiste em respeitar as cinco etapas em que o mesmo é dividido: (1) testes dinâmicos e coleta de dados; (2) escolha da representação matemática a ser usada; (3) determinação da estrutura do modelo; (4) estimação de parâmetros e (5) validação do modelo (WOLFRAM, 2005).

3.5 Sistemas Emergentes e Inteligentes

Até pouco tempo, um sistema era considerado “emergente” quando não se compreendia seu comportamento ou quando não se podia explicar como algo funcionava a partir da análise de suas partes. Isto é, havia uma conotação de ignorância associada ao termo. Quando se encontrava explicação, o termo “emergente” deixava de ser utilizado. Aos poucos o sistema emergente foi ganhando espaço próprio, passando a ser visto como uma característica intrínseca de sistemas com certo nível de complexidade, aqueles que não são simples demais para serem estudados pelas suas partes unicamente.

Um sistema é emergente quando é constituído de partes simples capazes de interações locais. As múltiplas interações entre essas partes auto-organizam um comportamento útil e descentralizado no sistema como um todo, que não pode ser explicado através de um encadeamento simples das partes. Estes são comportamentos construídos de baixo para cima (*bottom-up*).

Para entender a arquitetura de sistemas *bottom-up* existe uma necessidade comum de compreender como partes simples, independentes e praticamente idênticas podem agir de baixo para cima, se auto-organizando, para resultar em um sistema emergente, completo e funcional. Conseqüentemente, a criação de sistemas artificiais que se assemelham a organismos vivos deve partir da observação das funções cotidianas de tais organismos e na tentativa de desenvolver algoritmos que tenham um comportamento, no mínimo, de uma cópia grosseira e malfeita (PEREIRA, 2007).

Como exemplo pode citar-se a robótica. Portanto, o termo “inteligência artificial” é empregado para se referir ao processo que investiga formas diversas de agregar à máquina, a capacidade de “comparar e decidir”.

A inteligência artificial se entende por um conjunto de atividades que somente o ser humano é capaz de efetuar, o qual é incorporado ao computador em torno da inferência. Este processo consiste em seguir um padrão estabelecido como lógico, então, a partir deste, podem-se tomar decisões com base em ações programadas previamente. Portanto, a inteligência artificial requer conhecimento, para o qual existem diversas técnicas. Estas se constituem em métodos que exploram o conhecimento, o qual é representado de tal forma que capture generalizações, facilite compreensão e se modifique para corrigir erros e refletir mudanças, possibilite o uso em inúmeras situações, mesmo que não seja totalmente preciso nem esteja completo, e supere seu próprio volume. Uma das técnicas heurísticas de inteligência é a técnica de comparação, a partir da qual escolhe alternativas. Esta técnica é conhecida como “técnica de gerar e testar”, e consiste em três etapas: a primeira etapa consiste em gerar uma solução possível. Para alguns problemas, isto significa gerar um ponto em particular no espaço de problemas. Entretanto, para outros, significa gerar um caminho a partir de um estado inicial. A segunda etapa objetiva testar para ver se o resultado gerado é realmente uma solução, comparando o ponto escolhido ou o ponto final do caminho com o conjunto de estados (metas) aceitável. Finalmente, a terceira etapa constata se uma solução foi encontrada. Caso afirmativo sai da execução, do contrário volta à primeira etapa.

Resumindo, pode observar-se que a “técnica de gerar e testar” é uma estratégia primária quanto à inteligência, porém é bem sucedida e não tem nenhuma restrição proibitiva.

3.6 Otimização da Síntese de MEMS

A maioria das pesquisas na área de dispositivos MEMS visa a diminuir o custo destes e confirmar a qualidade dos mesmos (DENG, 2005). Estes fatores são garantidos pela produção em lote (*batch*), onde milhões de componentes são fabricados numa única lâmina (ou *wafer*) por vez. Os testes para detecção de falhas também tem feito sua parte aumentando a confiabilidade e a qualidade do produto final (LITOVSKI, 2005). Na fase de projeto, a simulação tem sido beneficiada com sofisticadas pesquisas, tornado-a altamente semi-automática e inteligente (LIN, 2006).

A simulação é baseada em um modelo, cuja quantidade de detalhes, efeitos físicos envolvidos, validação de hipóteses e simplificação tornam o processo atrativo. A seleção de solutores e dos parâmetros de discretização também facilita a obtenção dos dados do material e da geometria. A resolução depende da velocidade da execução. Entretanto, as simulações não substituem a experiência do projetista, mas a complementam e acompanham de modo eficaz e eficiente (HE, 1997), (FINCH, 2000), (DEWEY, 2001). Porém, os projetistas de MEMS ainda dependem do “método de tentativa e erro” durante a execução do projeto. Isto, muitas vezes, resulta num processo interativo de “construção e quebra” o que causa elevados custos e longos tempos de projeto (*time-to-market*). Sendo assim, é desejável que a melhor ferramenta de projeto seja aquela que possa prever o mau funcionamento do MEMS no início do processo, permitindo eliminar essa iteratividade.

Uma das soluções para auxiliar o projetista é a otimização de macromodelos, pois estes permitem que o projetista pense rápido, agilize os cálculos e obtenha o

desempenho comportamental, tanto estático como dinâmico, em nível de sistema (SENTURIA, 1998). Também o macromodelo permite verificar e comparar os resultados de simulações realizadas em nível físico e com os dados obtidos das estruturas de teste. Obter os parâmetros característicos do macromodelo que descreve o comportamento linear dos atuadores eletromecânicos MEMS não é trivial.

Os parâmetros característicos de MEMS podem ser extraídos no próprio simulador ou identificados através da manipulação dos dados dos sinais de entrada e saída obtidos na execução de testes modais sobre o protótipo (como descrito na seção 2.5.2). A extração consiste na obtenção dos parâmetros do desenho geométrico e, em seguida, na aplicação de técnicas numéricas para ajustar o projeto de modo que todos os parâmetros exigidos para desempenho sejam obtidos (MUKHERJEE, 1998), (MUKHERJEE, 1999).

Cabe considerar que a identificação, quando é determinística, utiliza sinais de excitação que obedecem a uma boa relação sinal-ruído (*SNR-Signal-Noise Rate*) (AGUIRRE, 2004). Este fato torna menos importante as perturbações ocasionadas no sinal de saída do dispositivo, de forma que, com a utilização de sinais do tipo, degrau e impulso, estabelecem-se as possíveis instabilidades nesses dispositivos. Caso não se consiga uma boa relação sinal ruído haverá necessidade de diminuir os efeitos da perturbação, o que é possível através da redução da fonte ruído (utilizando filtros), redução por malhas de controle (*feedback*) e redução por sinal de compensação (*feedforward*); elevando o custo dos testes determinísticos (LJUNG, 2004).

Para superar as dificuldades mencionadas, a utilização de testes estocásticos é uma alternativa eficaz (AGUIRRE, 2004). Portanto, nos últimos anos, tem havido alguns progressos no sentido de automatizar a identificação dos parâmetros característicos com esse tipo de técnica (HASSUL, 1992), (WOLFRAM, 2005). Os testes estocásticos são baseados na utilização de variáveis aleatórias. Alguns trabalhos focam a otimização paramétrica de subsistemas pré-definidos, a fim de melhor satisfazer os requisitos de desempenho. Entre as técnicas utilizadas estão o método de pesquisa global estocástico e o método de otimização local. A dificuldade nestas técnicas é a estrutura complexa que apresentam os dispositivos MEMS e o ambiente em que estão inseridos. Outro problema é o seguimento simultâneo de vários objetos, como também, a divisão desses objetos em novas entidades, ou, pelo contrário, a fusão numa única entidade. Também é problemática a variação da tipologia por problemas de ruído ou alterações de condições ambientais. Por outro lado as técnicas de otimização local são utilizadas na obtenção dos parâmetros quando o projetista possui conhecimento da estrutura do dispositivo MEMS. Esta técnica usa informação gradual que está relacionada com as variáveis de projeto e função base, permitindo encontrar eficientemente o parâmetro local. (ZHANG, 2006)

Também tem sido proposto um processo de síntese automatizada, onde soluções são sintetizadas usando algoritmo genético (GA – *Genetic Algorithm*) baseados em otimização evolutiva (LI, 1998). Algoritmos genéticos é uma classe particular de algoritmos evolutivos que usam técnicas inspiradas pela biologia evolutiva como hereditariedade, mutação, seleção natural e recombinação (ou *crossing over*). Algoritmos genéticos diferem dos algoritmos tradicionais de otimização em basicamente quatro aspectos. O primeiro é que se baseiam em uma codificação do conjunto das soluções possíveis, e não nos parâmetros da otimização em si. Segundo, os resultados são apresentados como uma população de soluções e não como uma solução única. A terceira diferença é que não necessitam de nenhum conhecimento derivado do problema, apenas de uma forma de avaliação do resultado. Finalmente, usam transições

probabilísticas e não regras determinísticas. Posteriormente, este trabalho tem sido estendido para uma síntese mais avançada de MEMS, explorando os requisitos geométricos e a interação humana na síntese (KAMALIAM, 2002). Outro desenvolvimento é a síntese hierárquica de MEMS, a qual integra biblioteca de componentes de objetos orientados e técnicas evolutivas de computação híbrida com dois níveis de otimização: algoritmos genéticos globais e gradiente baseado em refinamento local. Outros métodos também têm sido propostos para a síntese de MEMS. Alguns propõem uma abordagem comportamental para projeto (ZHOU, 2002). Tem-se aplicado ainda programação genética e gráfica em nível de sistema. Resumindo, os GAs são apropriados para problemas de otimização complexos, que envolvem muitas variáveis e um espaço de soluções de dimensão elevada. Este fato demanda tempo de processamento (ZHANG, 2006).

Arrefecimento simulado (*SA-simulated annealing*), por sua vez, consiste numa técnica de busca local probabilística, e se fundamenta numa analogia com a termodinâmica (KAMALIAM, 2004). O processo consiste de duas etapas: na primeira a temperatura do sólido é aumentada para um valor máximo no qual ele se funde; na segunda o resfriamento deve ser realizado lentamente até que o material se solidifique, sendo acompanhado e controlado esse arrefecimento. De forma análoga, o algoritmo de arrefecimento simulado substitui a solução atual por uma solução próxima (na sua vizinhança no espaço de soluções), escolhida de acordo com uma função-base e com uma variável T (dita Temperatura, por analogia). Quanto maior for T , maior a componente aleatória que será incluída na próxima solução escolhida. À medida que o algoritmo progride, o valor de T é decrementado, começando o algoritmo a converter para uma solução ótima, necessariamente local (ACHICHE, 2007).

Existem modelos estocásticos que levam em consideração o ruído. No domínio da frequência são denominados de não paramétricos, pois o resultado dos parâmetros característicos não é um número e sim um gráfico. Apresentam desvantagem na execução, pois o espectro de frequência a ser varrido é muito amplo. Conseqüentemente, a realização destes testes necessita geradores com faixas de diferentes intervalos de frequência para poder realizar o teste. Cabe considerar que as amplitudes dos sinais de excitação dificilmente apresentam precisão (LIN, 2006). Entretanto, uma notável classe de métodos multivariáveis no domínio do tempo, com base na família do modelo paramétrico pode ser utilizada (LJUNG, 1996), (AGUIRRE, 2004). Nesses métodos, as propriedades dinâmicas são descritas por um sistema de equações lineares de diferenças, cujos coeficientes matriciais autorregressivos governam a relação entrada-saída do sistema. Estes métodos fazem da perturbação (ruído) uma aliada para a determinação dos parâmetros. Nestes o sinal degrau unitário é considerado a excitação mais simples a ser aplicado para determinar os parâmetros, porém a energia fornecida ao sistema é limitada. O que, por vezes, impede a identificação dos parâmetros (CIGADA, 2007).

Apesar das contribuições levantadas, a síntese de MEMS ainda é uma área do projeto propensa a inovações. Utilizar a identificação de sistemas se torna interessante em função da geometria dos dispositivos MEMS e do ambiente em que operam, já que estes obedecem a dimensões de ordem micrométricas. Essa fragilidade na manipulação pode ser diminuída com a utilização desta tecnologia, porquanto, para identificar os parâmetros, unicamente é necessário o conjunto de dados de excitação e resposta. Os métodos de identificação estocástica apresentados até o momento demandam tempo de processamento computacional (ZHANG, 2006). Também, esses métodos não consideram que os sinais de excitação aplicados aos dispositivos MEMS estão

contaminados com ruído e, portanto, este pode excitar dinâmicas de fenômenos físicos desconhecidos provocando perturbações no sinal de saída.

3.7 Proposta: Identificação “Caixa Cinza para MEMS

Em métodos de identificação caixa-preta, nenhuma informação sobre o sistema está disponível além dos dados ou, se disponível, não é usada no procedimento de obtenção do modelo. Neste caso, apenas dados de entrada e saída do sistema são usados durante a identificação. A escolha da representação e da sua estrutura é feita de forma empírica nos casos mais simples. Tais métodos baseiam-se em técnicas de álgebra linear e em conceitos de estatística. Na identificação caixa-preta não existe nenhuma relação óbvia entre a estrutura e seus parâmetros com aspectos físicos do sistema sendo identificado.

Na identificação “caixa-branca”, ou simplesmente modelagem física, o processo de obtenção do modelo se baseia em leis e princípios físicos. Todos os parâmetros são conhecidos ou previamente determinados. Dados de entrada e saída do sistema, quando disponíveis, são usados apenas para validar o modelo. Na identificação “caixa branca”, os termos da estrutura e seus parâmetros possuem significado físico (GARCIA, 1997). Um termo muito utilizado na literatura é “conhecimento *a priori*”. Apesar de não haver uma definição formal para tal conhecimento, parece adequado chamar de conhecimento *a priori* apenas de informação oriunda das leis físicas que regem o processo e qualquer outra informação (NEPOMUCENO, 2002).

Como desvantagens da identificação “caixa-preta” podem-se citar, em geral, o fato de estrutura do modelo não possuir significado físico, a dificuldade para sua seleção e, em muitos casos, o número excessivo de parâmetros. Como vantagens, em geral, são enumeradas a relativa facilidade de obtenção e a possibilidade de se escolher estruturas mais adequadas para o projeto de sistemas de controle (POTTMANN, 1998).

Como desvantagem da modelagem “caixa-branca”, destaca-se a dificuldade de obtenção do modelo. Em geral, as equações físicas envolvidas em um processo, assim como seus parâmetros, não são totalmente conhecidas. Muitas vezes, as relações são por demais complexas e não podem ser determinadas. Como principal vantagem, destaca-se o significado físico do modelo obtido.

Essas duas formas de modelagem podem ser interpretadas como os dois extremos de técnicas de modelagem. A rigor, qualquer procedimento que não esteja em nenhum desses extremos pode ser denominado de identificação “caixa-cinza”. Dessa forma a proposta deste trabalho investigativo consiste em utilizar a identificação “caixa cinza” para obter os parâmetros característicos dos atuadores eletromecânicos MEMS combinando as vantagens dos procedimentos de identificação “caixa-preta” e “caixa-branca”. A expectativa é reproduzir os parâmetros característicos com maior robustez e precisão sob o desempenho comportamental dos dispositivos MEMS, utilizando para tal, o conhecimento *a priori* da modelagem matemática em sua forma determinística como a frequência de ressonância e o modelo matemático de segunda ordem que descreve o comportamento linear dos dispositivos MEMS. No caso da identificação “caixa preta”, utilizar-se-á o modelo matemático ARX (LJUNG, 1987), pela semelhança que apresenta com o modelo determinístico, e pela robustez dos estimadores recursivos, RLS e RIV (AGUIRRE, 2004), ao trabalhar com sinais de excitação contaminados com ruído. Outra das expectativas é diminuir o tempo de processamento computacional pela recursividade algébrica que possuem os algoritmos.

Também se espera otimizar o desempenho do degrau como sinal de excitação, visto que a adição de ruído deve torná-lo um sinal de excitação persistente. Desta forma, fornecer-se-á energia suficiente para evitar que o dispositivo em teste entre em estado de dormência. Finalmente, as características de desempenho desejadas de sistemas com armazenamento de energia não podem responder instantaneamente, de forma que há necessidade de um tempo de acomodação. Logo, o tempo de acomodação é o tempo necessário para o sinal de resposta alcançar e permanecer dentro de uma faixa em torno do valor final, faixa esta de magnitude especificada por uma porcentagem absoluta do valor final (normalmente de 2% a 5%) (OGATA, 1993). A escolha de que porcentagem usar no critério de erro pode ser determinado a partir dos objetivos do projeto do sistema. Conseqüentemente espera-se que os parâmetros característicos obtidos permitam que os atuadores eletromecânicos apresentem um desempenho comportamental com um erro não maior que 3%, quando comparado com o desempenho nominal. Porcentagem que obedece ao valor intermediário da faixa estipulada. A sistemática adotada no desenvolvimento da proposta é apresentada na Figura 3.4.

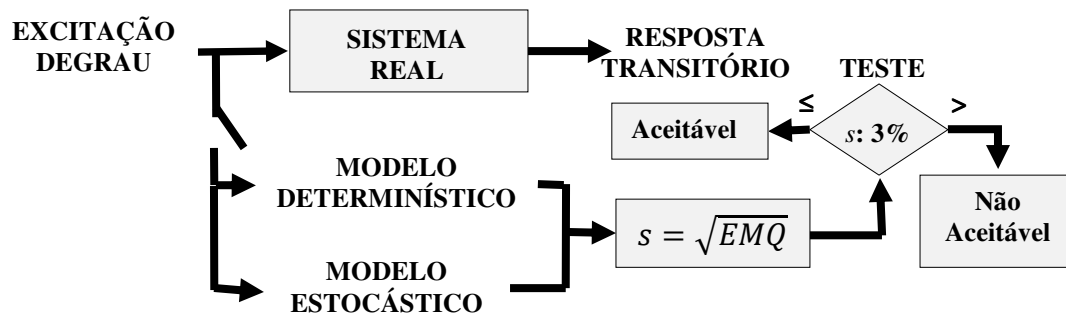


Figura 3.4: Identificação “caixa cinza” para a síntese do projeto de MEMS.

4 METODOLOGIA E RESULTADOS

Num primeiro momento as elasto-massas e os atuadores MEMS submetidos a teste são descritos. Apresenta-se a operacionalização da Identificação de Sistemas mediante a execução de cada uma das etapas e respectiva aplicação aos dispositivos sob teste. Finalmente, a comparação dos resultados quanto à eficácia e eficiência é apresentada destacando o desempenho dos estimadores utilizados.

**“O começo é a parte mais importante de um trabalho.”
Platão (427aC–347aC).**

4.1 Metodologia

A motivação para o estudo de técnicas de identificação de sistemas surge ao não se conhecerem as equações envolvidas no funcionamento de um determinado sistema ou elas são conhecidas, mas é impraticável, por limitações de tempo e de recursos, levantar tais equações e estimar os respectivos parâmetros característicos. Porém, há um conjunto de técnicas de identificação que pode ser classificado como identificação “caixa cinza”. Este grupo de técnicas está entre o grupo das técnicas de identificação “caixa branca” e “caixa preta” (DEMARTINI, 2005), (HARONIAN, 1995).

Na identificação “caixa cinza”, a polaridade “caixa branca” – “caixa preta” é relativizada pela combinação dos aspectos positivos destes dois tipos. Neste caso, além dos dados obtidos a partir do conhecimento fenomenológico da realidade, usam-se também as informações auxiliares oriundas de séries históricas do sistema, permitindo uma associação da dinâmica que eles podem produzir com a estrutura do modelo e seus parâmetros (AGUIRRE, 2007).

A identificação “caixa cinza” é uma metodologia baseada em cinco etapas: (1) seleção de testes dinâmicos e coleta de dados; (2) escolha da representação do modelo matemático; (3) determinação da estrutura do modelo; (4) seleção do estimador de parâmetros; e, (5) validação do modelo. Cada uma dessas etapas pode utilizar-se do conhecimento *a priori* do projetista, e minimizar o tempo de execução de cada uma delas. Entretanto, anterior a sua aplicação, três tipologias de atuadores eletromecânicos MEMS baseados em deformação elástica e estrutura *comb-drive* foram selecionados para a realização de testes e constatar as expectativas quanto à eficácia da técnica proposta. A escolha dos atuadores foi realizada sobre os critérios de simplicidade na estrutura, grau de liberdade numa única direção e acessibilidade ao modelo analítico. As três tipologias das elasto-massas pertencentes aos atuadores são mostradas na Figura 4.1 e suas dimensões encontram-se no Anexo A (JAECKLIN, 1992).

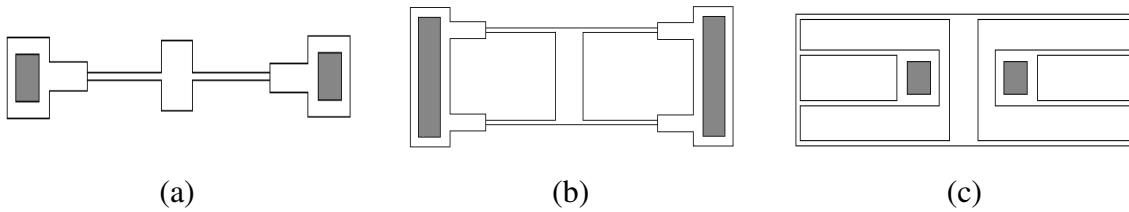


Figura 4.1: Massas-elásticas: (a) pontes simples, (b) ponte dupla, (c) dobradiça dupla.

Essas elasto-massas integradas ao *comb-drive*, admitem três tipos de atuadores, de tal forma que o atuador ponte simples é de predominância teórica, permitindo compreender o princípio de atuação, embora possa ser utilizado na construção de interruptores de ação simples (ver Figura 4.1.a). O atuador ponte dupla é utilizado em pinças, válvulas, posicionamento de micro-espelhos, sensores e acelerômetros (Ver Figura 4.1.b) (DE LOS SANTOS, 1999), (GAD-EL-HAK, 2002). Por outro lado, o atuador tipo dobradiça dupla é muito utilizado em telecomunicações, como transformadores, amplificadores, atenuadores, *mixers*, entre outros (ver Figura 4.1.c), (TANG, 1989), (TANG, 1990), (WANG, 1999), (EHRFELD, 1998). Essas três tipologias de atuadores são mostradas na Figura 4.2, e seu circuito equivalente de parâmetros concentrados é apresentado na Figura 4.3.

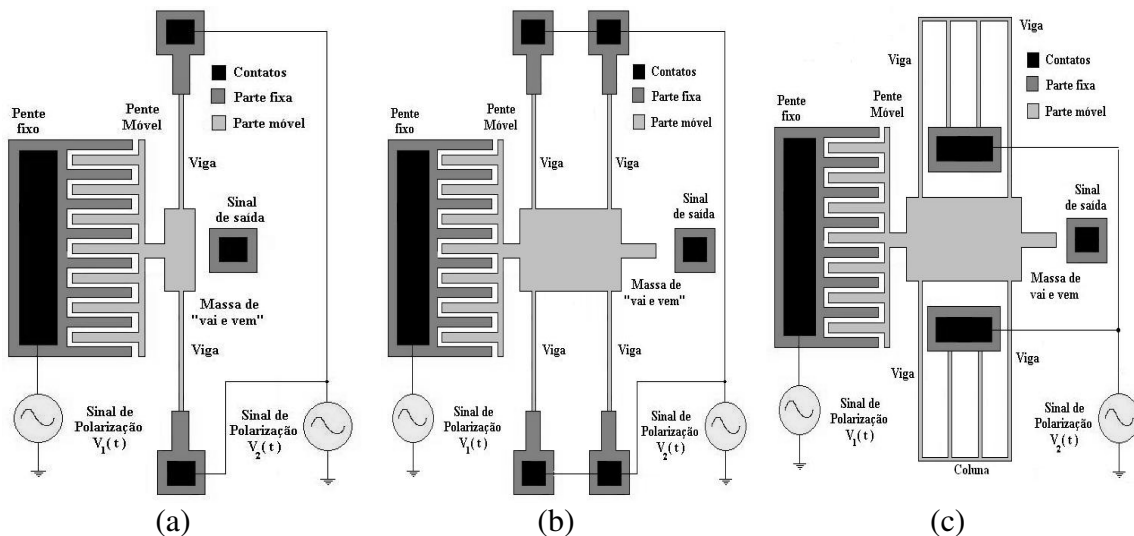


Figura 4.2: Atuadores eletrostáticos teste utilizados na síntese de projeto.

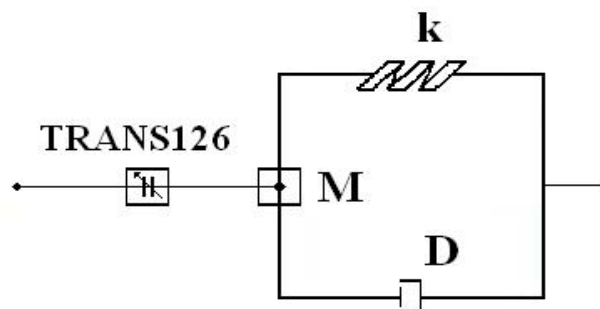


Figura 4.3: Circuito de parâmetros concentrados de atuadores eletrostáticos.

4.2 Seleção de Testes Dinâmicos e Coleta de Dados

Uma vez que a identificação se propõe obter modelos matemáticos a partir de dados coletados, é necessário verificar como se pode dispor deles. Muitas vezes os únicos dados disponíveis são os dados de “operação normal”, mas há vezes também que é possível e desejável efetuar testes, de forma a obter informação dinâmica do sistema. A escolha da realização dos testes é um problema relacionado aos sinais de excitação e ao tempo de amostragem, devendo ser criteriosamente analisados.

4.2.1 Plataforma de Teste

Neste trabalho, a coleta de dados é feita a partir da plataforma de teste desenvolvida no aplicativo ANSYS (*Analysis Systems*) (SWANSON, 1998). Este é uma ferramenta computacional baseada em elementos finitos (FEM – *Finite Element Method*) e elementos de fronteira (BEM – *Boundary Element Method*) e permite realizar simulações sobre estruturas previamente desenhadas, uni-(1D), bi-(2D) e tridimensionais-(3D). Mediante esse software de elementos finitos é possível fazer diferentes análises, como Estática, Modal, Harmônica, Transitória e Espectral.

Para a simulação de deformação de sólidos dispõe-se de elementos como o SOLID45 e o SOLID95, entre outros. O SOLID45 é um elemento que tem plasticidade, fluência, dilatação, rigidez, estresse, deflexões e deformação. Para garantir que todos os elementos SOLID45 possuam a forma de prisma nas geometrias complexas, é necessário definir o formato da malha, pois o tamanho de cada elemento contribui na obtenção de soluções mais precisas além de aperfeiçoar o trabalho computacional. A geometria, a localização dos nodos e o sistema de coordenadas de cada elemento são apresentados na Figura 4.4. Cabe considerar que o SOLID45 é um elemento que não permite anisotropia e é recomendado para ser utilizado na forma de prisma.

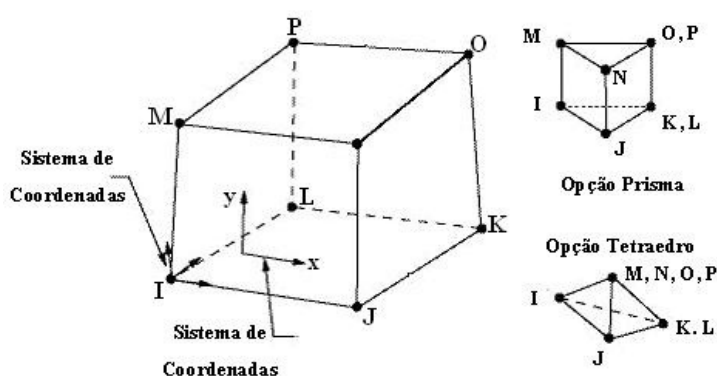


Figura 4.4: Geometria do elemento SOLID45 (SWANSON, 1998).

Por outro lado, o *comb-drive* é implementado utilizando-se diferentes soluções que acoplam forças eletrostáticas e estruturas mecânicas, tais como ESSOLV, TRANS126, EMTGEN, TRANS109, CMATRIX e ROM. Entretanto, o presente trabalho foca o uso do elemento TRANS126, mostrado na Figura 4.5, onde ‘ d_i ’ e ‘ d_j ’ são as designações dadas aos nodos, ‘ C_1, C_2, C_3, C_4 e C_5 ’ representam capacitores, gap é a distância entre as placas do capacitor e ‘ k_n ’ é a rigidez do dispositivo.

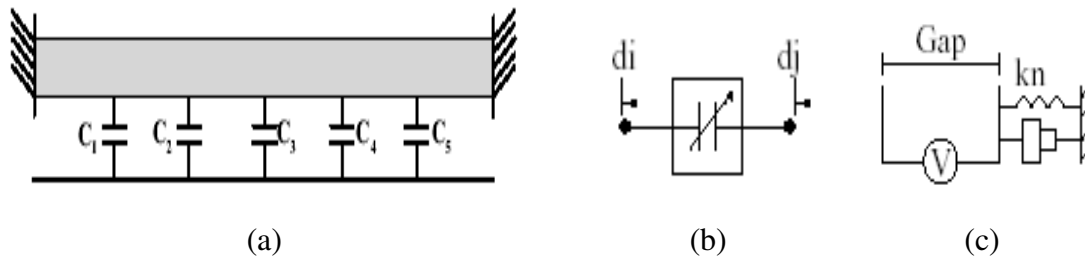


Figura 4.5: TRANS126: (a) banco capacitivo, (b) símbolo, (c) equivalente mecânico.

O TRANS126 é um elemento concentrado, ou macro elemento, de ordem reduzida, o qual converte energia do domínio eletrostático para o domínio estrutural, e vice-versa. É um elemento utilizado para análise de voltagem e de corrente, específico para aplicação em simulações 3D. Isto conduz a remover a malha eletrostática da estrutura, substituindo-a por um conjunto de capacitores interligados entre o campo mecânico e o campo elétrico.

As forças eletrostáticas no TRANS126 são obtidas utilizando-se a derivada da capacitância como função da distância e cuja análise pode ser feita a partir da Figura 4.6.a.

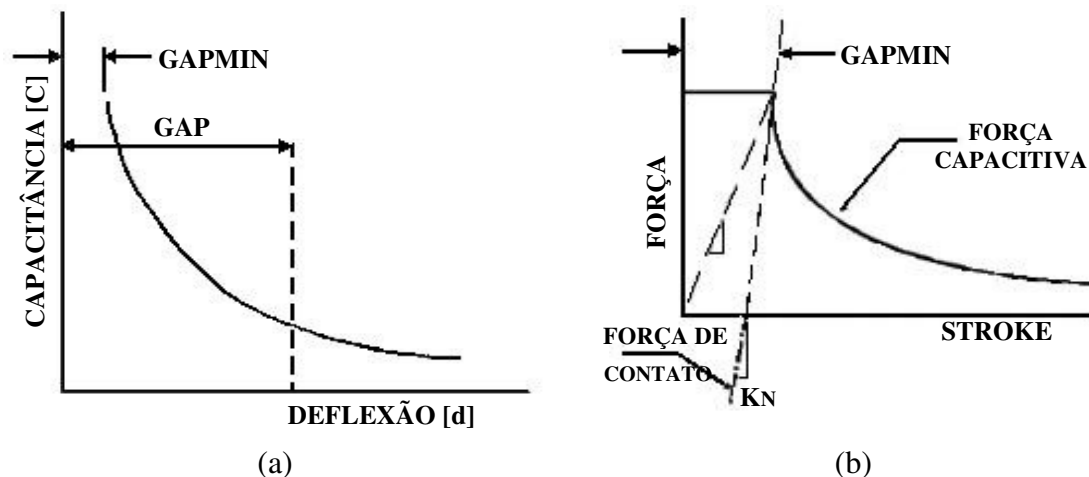


Figura 4.6: Características do TRANS126: (a) capacitância *versus* deslocamento, (b) repulsão eletro-mecânica.

Entretanto, a capacitância no elemento TRANS126 do ANSYS® é definida através da expressão (4.1).

$$C(x) = \frac{C_0}{x} + C_1 + C_2x + C_3x^2 + C_4x^3 \quad (4.1)$$

Logo, a força eletrostática é calculada através da equação:

$$F = -\frac{1}{2} \frac{\partial C(x)}{\partial x} V^2 = \frac{V^2}{2} \left[-\frac{C_0}{x^2} + C_2 + 2C_3x + 3C_4x^2 \right] \quad (4.2)$$

O elemento TRANS126 também tem a capacidade de contato, de forma que é possível especificar um *gap* mínimo e uma rigidez da mola ‘ k_n ’ para gerar uma força de repulsão (ver Figura 4.6.b). A desvantagem deste elemento é a limitação quanto a sua utilização como capacitor de placas planas paralelas, pois o colapso da função capacitância/distância somente pode ser avaliado num único grau de liberdade (LIENEMANN, 2006).

O comando EMTGEN é um macroelemento da ferramenta ANSYS® que gera automaticamente um conjunto distribuído de elementos TRANS126 entre as superfícies dos eletrodos do modelo.

4.2.2 Sinais de Excitação

Os sinais de excitação devem obedecer a uma correlação significativa entre as variáveis de entrada e saída do sistema (EYKHOFF, 1974). Portanto, a escolha do sinal de entrada deve ser feita de modo que apresente excitação persistente, ou seja, deve excitar o sistema numa ampla faixa do espectro de frequência, semelhante à faixa de operação à qual o sistema será submetido, para que seja fielmente representado. Assim, na escolha do sinal de excitação deve ser considerada a velocidade e a amplitude do mesmo. A Tabela 4.1 apresenta alguns dos sinais conhecidos e muito utilizados em excitação persistente (SILVA, 1997).

Tabela 4.1: Ordem de excitação de alguns sinais conhecidos (AGUIRRE, 2004).

Sinal	Ruído Branco	PRBS	Degrau	Impulso
Ordem de excitação	∞	∞	1	0

No caso deste trabalho, nos testes realizados o ruído foi gerado dentro da plataforma de teste.

4.2.3 Tempo de Amostragem

As características fundamentais de um sinal original podem ser retidas num sinal amostrado somente se o período ‘ T_s ’ de amostragem for suficientemente curto. O teorema de *Shannon* estabelece que um sinal que não contenha componentes de frequência acima de $\frac{1}{2} T_s$, pode ser determinado a partir de amostras separadas por ‘ T_s ’. Conseqüentemente, os sinais amostrados ‘ $F(i)$ ’ e ‘ $X(i)$ ’ indicados na Figura 3.3, obedecem à seguinte expressão:

$$f_a \geq 2 f_s \quad (4.3)$$

na qual, ‘ f_a ’ é a frequência de amostragem e ‘ f_s ’ a frequência do sinal a ser amostrado. Na prática, a frequência de amostragem é normalmente escolhida numa faixa 5 a 10 vezes maior do que a maior frequência de interesse contida nos dados. Neste trabalho, o período de amostragem que satisfaz as três tipologias, tanto as elasto-massas como os atuadores, é de 5×10^{-6} s.

4.3 Determinação da Representação Matemática

O modelo auto-regressivo de entradas exógenas (ARX - *Autoregressive with Exogenous Inputs*) é um modelo, diretamente, relacionado com a função de

transferência discreta do sistema (AGUIRRE, 2004), (LJUNG, 1987). Sua escolha foi feita com base na estrutura que apresenta, a qual é análoga à função de transferência de MEMS. Também o modelo se apresenta simples e não adiciona novos polinômios, permitindo rearranjar os parâmetros dos membros do mesmo e conduzindo a uma significativa redução de operações algébricas, embora incorpore esses parâmetros sob a forma de novos parâmetros, o que não é empecilho para sua eventual recuperação. Este tipo de técnica diminui consideravelmente o trabalho computacional. O diagrama em blocos de um modelo ARX é apresentado na Figura 4.7, e seu modelo matemático obedece à expressão (4.4):

$$X(i) + a_1X(i-1) + \dots + a_{n_a}X(i-n_a) = b_1F(i-1) + \dots + b_{n_b}F(i-n_b) + e(i) \quad (4.4)$$

onde 'i' é o momento atual, 'n' representa os instantes anteriores, 'X(i-n)' é o sinal de saída, 'F(i-n)' é o sinal de entrada, 'e(i)' é o erro residual, 'n_a' é o número de coeficientes do polinômio 'A' e 'n_b' é o número de coeficientes em 'B'.

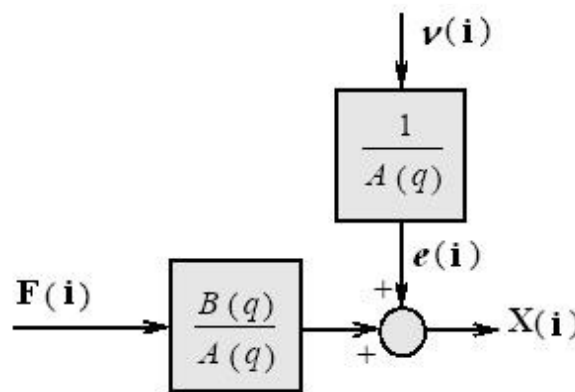


Figura 4.7: Representação esquemática do modelo ARX.

O diagrama em blocos da Figura 4.7 resulta da expressão geral discreta (3.13), que ao fazer os polinômios $C(q) = D(q) = F(q) = 1$ e arbitrar os polinômios 'A(q)' e 'B(q)', define a expressão do modelo ARX. Esta pode ser re-escrita sob a forma de funções singulares discretas como em (4.4).

4.4 Eleição da Ordem do Modelo

A escolha do valor da ordem do modelo foi feita baseando-se na ordem do modelo analítico do sistema, neste caso, o modelo dos atuadores eletrostáticos da expressão (3.1). Para o modelo discreto ARX de MEMS a ordem escolhida, convenientemente foi dois. Aplicando Laplace ao modelo analítico de MEMS, inicia-se a identificação do vetor regressor na expressão (4.5):

$$M s^2 X(s) + D s X(s) + k X(s) = F(s) \quad (4.5)$$

Aplicando-se a transformada Z resulta que:

$$X(z) + \beta z^{-1}X(z) + \gamma z^{-2}X(z) = \alpha z^{-1}F(z) \quad (4.6)$$

onde ‘ α ’, ‘ β ’ e ‘ γ ’ são os elementos que contêm os valores dos parâmetros característicos da expressão (4.5). Logo, a expressão (4.6) é re-escrita como multiplicação de um vetor linha por um vetor coluna conforme:

$$x(i) = [-x(i-1) - x(i-2) + f(i-1)] \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

de forma tal que o vetor de regressores ϕ^T possui a informação dos diferentes instantes em que aconteceram os eventos favoráveis ao processo, e os elementos ‘ α ’, ‘ β ’ e ‘ γ ’, possuem as estimativas desses eventos, sendo definidos pelas expressões:

$$M = \frac{F_e}{\alpha} \quad (4.8)$$

$$D = \frac{F_e}{\beta} \quad (4.9)$$

$$k = \frac{F_e}{\gamma} \quad (4.10)$$

4.5 Escolha do Estimador de Parâmetros

Dois estimadores recursivos amplamente utilizados em identificação de sistemas é o Estimador de Mínimos Quadrados e o Estimador Variável Instrumental (AGUIRRE, 2004). Seus algoritmos obedecem ao cálculo seqüencial e recursivo dos parâmetros apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2: Algoritmo do estimador recursivo mínimos quadrados (AGUIRRE, 2004).

Nome	Matriz
Matriz de Ganho	$L_i = \frac{P_{i-1} \phi_i}{\phi_i^T P_{i-1} \phi_i + 1}$
Matriz de Parâmetros	$\hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + L_i [X(i) - \phi_i^T \hat{\theta}_{i-1}]$
Matriz de Covariância	$P_i = P_{i-1} - L_i \phi_i^T P_{i-1}$

Tabela 4.3: Algoritmo do estimador recursivo variável instrumental (AGUIRRE, 2004).

Nome	Matriz
Matriz de Covariância	$M_i = M_{i-1} - \frac{M_{i-1} Z_i \phi_i^T M_i}{\phi_i^T M_{i-1} Z_i + 1}$
Matriz de Ganho	$L_i = M_i Z_i$
Matriz de Parâmetros	$\hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + L_i [X(i) - \phi_i^T \hat{\theta}_{i-1}]$
Diferença	$\epsilon_i = X(i) - \phi_i^T \hat{\theta}_i$

OBS: ‘ Z_i ’ é o vetor de variáveis instrumentais na i -ésima iteração.

4.6 Validação do Modelo - Resultados

O processo científico é iniciado com observações, embora estas sejam algumas vezes acidentais, são normalmente realizadas sob condições rigorosamente controladas no laboratório. Com isso, pode-se observá-lo inúmeras vezes, identificando (separadamente) os fatores que são responsáveis ou que, de algum modo, interferem no fenômeno; nesta etapa surgem as hipóteses de trabalho. É neste momento que, com base nas observações, o pesquisador tenta inferir as leis que regem o fenômeno em estudo.

As observações podem ser qualitativas ou quantitativas. Cada medida, não importando o grau de cuidado com qual ela é feita, está sujeita a erro experimental. Uma boa teoria deve apresentar as seguintes características:

- a) ser capaz de explicar um grande número de fenômenos com o menor número possível de leis físicas;
- b) ter o poder de previsão de novos fenômenos, os quais possam ser observados (testados).

No estudo de um fenômeno físico é, portanto, fundamental a realização de medidas. A medida de grandezas físicas permite obter informações acerca de como estas podem, ou não, estar correlacionadas, caracterizando o fenômeno que se quer estudar. Para validar os dados obtidos com relação ao modelo do atuador eletrostático de ação longitudinal, o erro relativo e o erro quadrático médio do deslocamento de cada elasto-massa e *comb-drive* é obtido. O erro relativo de um número ‘ δ_r ’ de um número aproximado é a diferença do valor identificado ‘ X_i ’ menos o valor medido ‘ X_m ’, cujo resultado é dividido pelo próprio valor identificado ‘ X_i ’ como na expressão (4.11).

$$\delta_r = \left| \frac{X_i - X_m}{X_i} \right| \times 100 \quad (4.11)$$

Sendo que o valor medido é valor obtido da plataforma de teste e o valor identificado é o valor gerado pelos estimadores utilizados nesse processo.

Um dos critérios mais utilizados para analisar o desempenho global de um estimador da densidade de probabilidade é o erro quadrático médio definido pela expressão (4.12) (AGUIRRE, 2004).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_1^n (X_i - X_m)^2}{N}} \times 100 \quad (4.12)$$

onde s é a raiz do erro quadrado médio e N é o número de amostras utilizado na experiência. Conseqüentemente para efeitos de comparação, primeiramente foram obtidos os parâmetros dos modelos determinísticos, tanto para o modelo analítico quanto para o modelo numérico, de forma a podê-los comparar posteriormente com os dados obtidos na identificação.

Num segundo momento as elasto-massas foram estudadas. Os parâmetros destas definem a frequência natural de cada atuador MEMS conforme foi apresentado na Seção 4.1. O Anexo B mostra o programa desenvolvido em MATLAB, que calcula cada parâmetro correspondente a cada uma das elasto-massas. Estes resultados são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Parâmetros das elasto-massas, modelo analítico (MATLAB®).

Parâmetros	Ponte Simples	Ponte Dupla	Dobradiça Dupla
ME-[kg]	$52,361 \times 10^{-12}$	$104,72 \times 10^{-12}$	$58,945 \times 10^{-12}$
D-[N s/m]	$0,19262 \times 10^{-6}$	$0,38524 \times 10^{-6}$	$0,20642 \times 10^{-6}$
k-[N/m]	0,58800	1,1760	0,58800
fr-[Hz]	16866	16866	15896
fd--[Hz]	16863	16863	15894
Xres-[m]	$6,8587 \times 10^{-6}$	$3,4293 \times 10^{-6}$	$6,7907 \times 10^{-6}$

O sinal de excitação aplicado a cada elasto-massa, consiste num degrau de força mecânica aplicado no instante $t = 0s$, com amplitude de $0,14 \times 10^{-6}N$, valor atribuído à intensidade do degrau visando a simplificar a expressão literal do modelo comportamental das elasto-massas, de forma a facilitar sua análise. Os dados na Tabela 4.5 são obtidos através da ferramenta computacional ANSYS®. As análises estática, modal e harmônica, permitiram constatar a frequência natural e os máximos deslocamentos. Os parâmetros extraídos das estruturas são mostrados nas Tabela 4.4 e Tabela 4.5, sendo o modelo analítico do comportamento de cada estrutura apresentado sob a forma gráfica na Figura 4.8, Figura 4.9 e Figura 4.10.

Tabela 4.5: Parâmetros das elasto-massas obtidos a partir do ANSYS®.

Análise	Ponte Simples	Ponte Dupla	Dobradiça Dupla
Estática Deslocamento [m]	$0,2388 \times 10^{-6}$	$0,1199 \times 10^{-6}$	$0,2404 \times 10^{-6}$
Modal f_n [Hz]	16836	16803	15775
Harmônica [m] Deslocamento	$\cong 6,5 \times 10^{-6}$	$\cong 4,5 \times 10^{-6}$	$\cong 6,5 \times 10^{-6}$

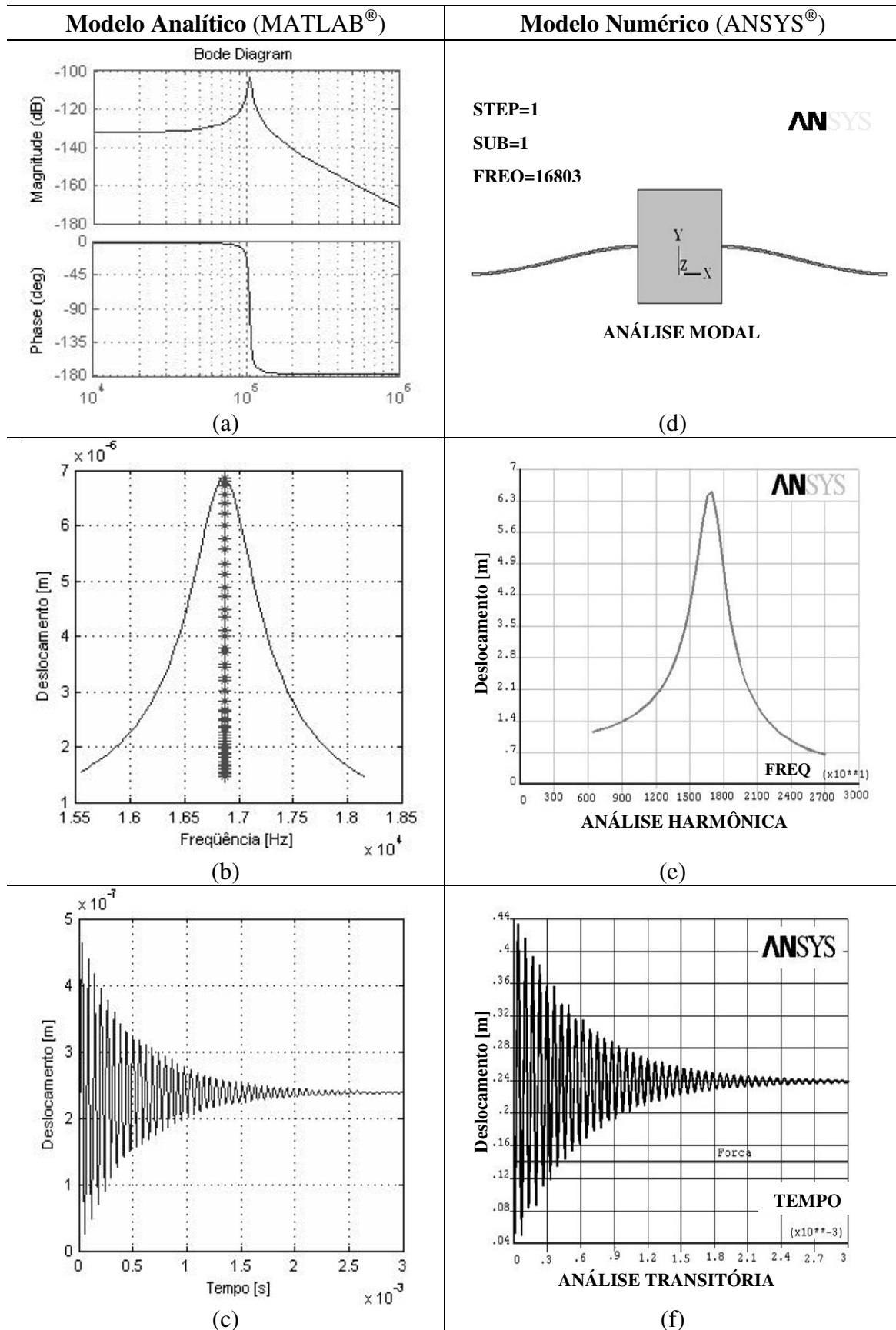


Figura 4.8: Análise da elasto-massa **ponte simples**. MATLAB®: (a) Frequência, (b) Harmônica, (c) Transitória. ANSYS®: (d) Estática, (e) Harmônica, (f) Transitória.

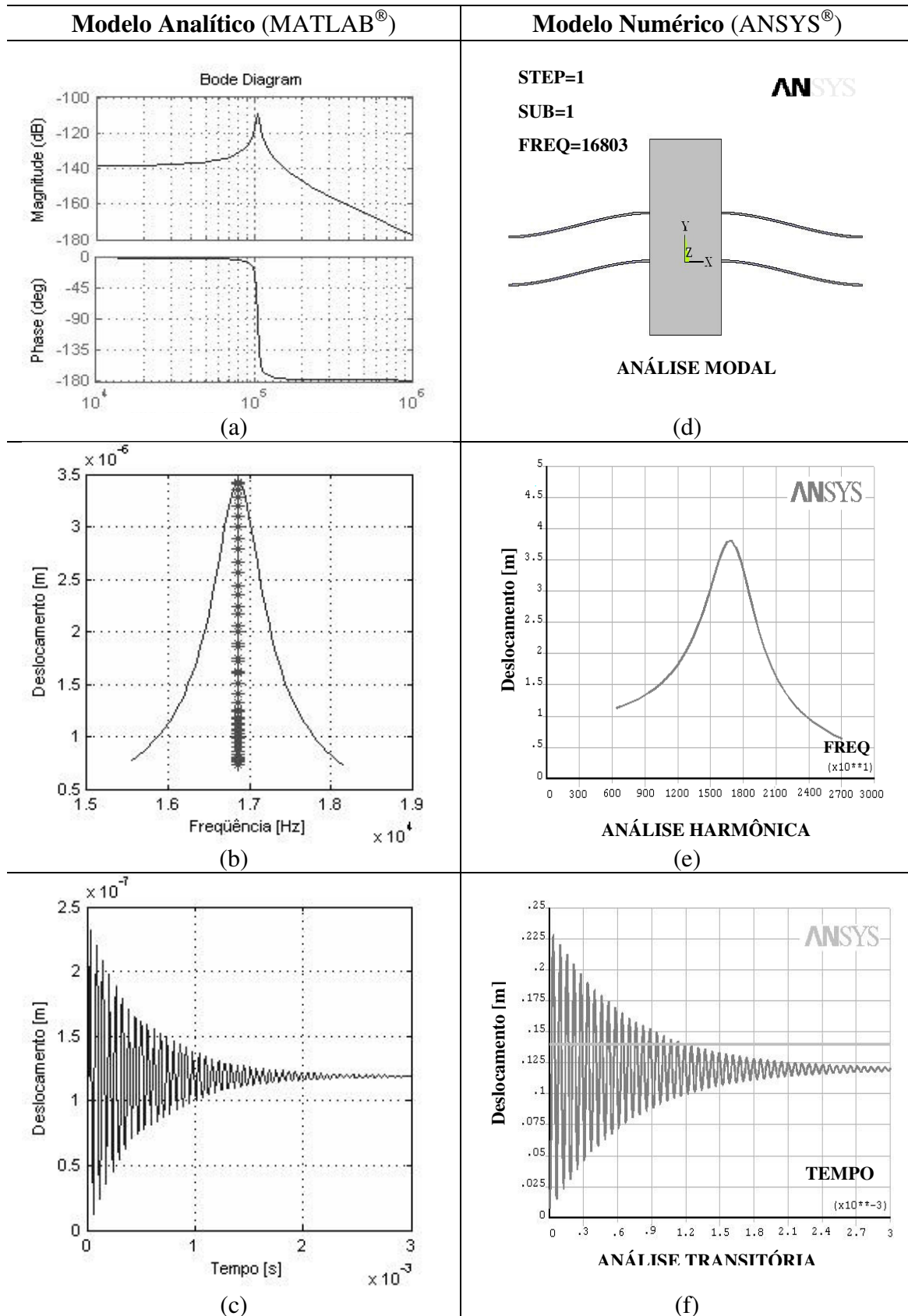


Figura 4.9: Análise da elasto-massa **ponte dupla**. MATLAB®: (a) Freqüência, (b) Harmônica, (c) Transitória. ANSYS®: (d) Estática, (e) Harmônica, (f) Transitória.

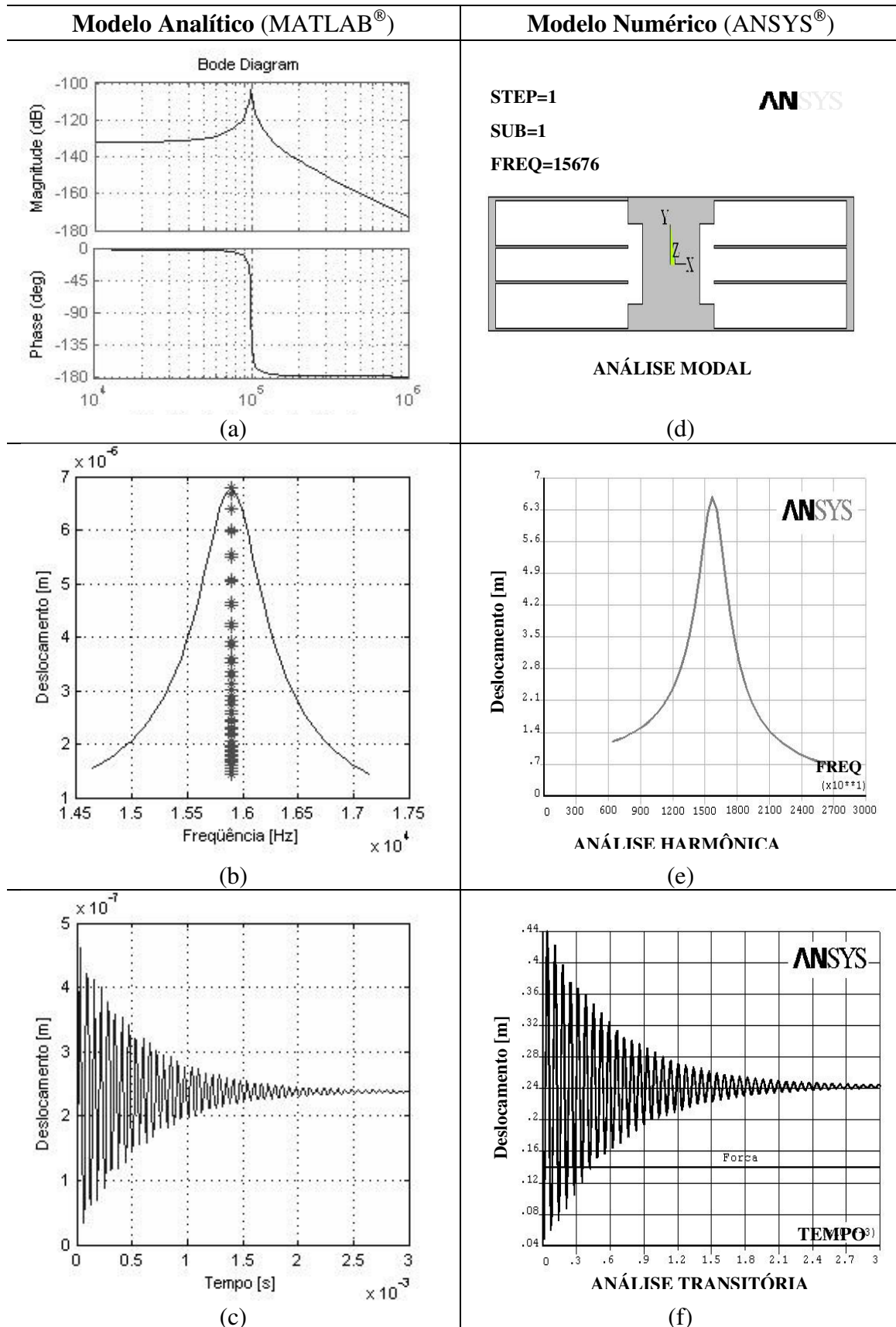


Figura 4.10: Análise da elasto-massa **dobradiça dupla**. (a) Frequência, (b) Harmônica, (c) Transitória. ANSYS®: (d) Estática, (e) Harmônica, (f) Transitória.

4.6.1 Validação da síntese do projeto de elasto-massas

Para constatar a eficácia das técnicas de identificação num primeiro momento foram aplicados os estimadores RLS (mínimos quadrados recursivo) e RIV (variável instrumental recursivo) aos dados amostrados de entrada e saída das três elasto-massas MEMS. Os sinais de entrada, num primeiro momento, não foram conjugados com ruído e seus resultados são mostrados nas Tabela 4.6, Tabela 4.7 e Figura 4.11, deixando para um segundo momento a injeção de ruído junto ao sinal de excitação, e sendo os resultados obtidos mostrados nas Tabela 4.8, Tabela 4.9 e Figura 4.12.

Tabela 4.6: ANSYS® vs. ARX e estimador **RLS** (elasto-massa **sem** ruído).

Parâmetros	Ponte Simples		Ponte Dupla		Dobradiça Dupla
ME-[kg]	$54,753 \times 10^{-12}$		$109,51 \times 10^{-12}$		$63,041 \times 10^{-12}$
D-[N s/m]	$0,20522 \times 10^{-6}$		$0,31769 \times 10^{-6}$		$0,22371 \times 10^{-6}$
k-[N/m]	0,58384		1,1678		0,59179
s%	$0,052257 \times 10^{-6}$		$0,029722 \times 10^{-6}$		$0,050250 \times 10^{-6}$

Tabela 4.7: ANSYS® vs. ARX e estimador **RIV** (elasto-massa **sem** ruído).

Parâmetros	Ponte Simples		Ponte Dupla		Dobradiça Dupla
ME-[kg]	$54,753 \times 10^{-12}$		$109,52 \times 10^{-12}$		$63,100 \times 10^{-12}$
D-[N s/m]	$0,20527 \times 10^{-6}$		$0,31787 \times 10^{-6}$		$0,22927 \times 10^{-6}$
k-[N/m]	0,58384		1,1678		0,59181
s%	$0,0522 \times 10^{-6}$		$0,0295 \times 10^{-6}$		$0,047194 \times 10^{-6}$

Tabela 4.8: ANSYS® vs. ARX e estimador **RLS** (elasto-massa **com** ruído).

Parâmetros	Ponte Simples		Ponte Dupla		Dobradiça Dupla
ME-[kg]	$54,60 \times 10^{-12}$		$111,28 \times 10^{-12}$		$64,72 \times 10^{-12}$
D-[N s/m]	$0,1475 \times 10^{-6}$		$0,2596 \times 10^{-6}$		$0,1342 \times 10^{-6}$
k-[N/m]	0,5837		1,1677		0,5919
s%	$0,1507 \times 10^{-6}$		$0,1018 \times 10^{-6}$		$0,1039 \times 10^{-6}$

Tabela 4.9: ANSYS® vs. ARX e estimador **RIV** (elasto-massa **com** ruído).

Parâmetros	Ponte Simples		Ponte Dupla		Dobradiça Dupla
ME-[kg]	$56,05 \times 10^{-12}$		$109,56 \times 10^{-12}$		$64,60 \times 10^{-12}$
D-[N s/m]	$0,2199 \times 10^{-6}$		$0,2669 \times 10^{-6}$		$0,1570 \times 10^{-6}$
k-[N/m]	0,5848		1.1666		0,5919
s%	$0,1491 \times 10^{-6}$		$0,0963 \times 10^{-6}$		$0,1093 \times 10^{-6}$

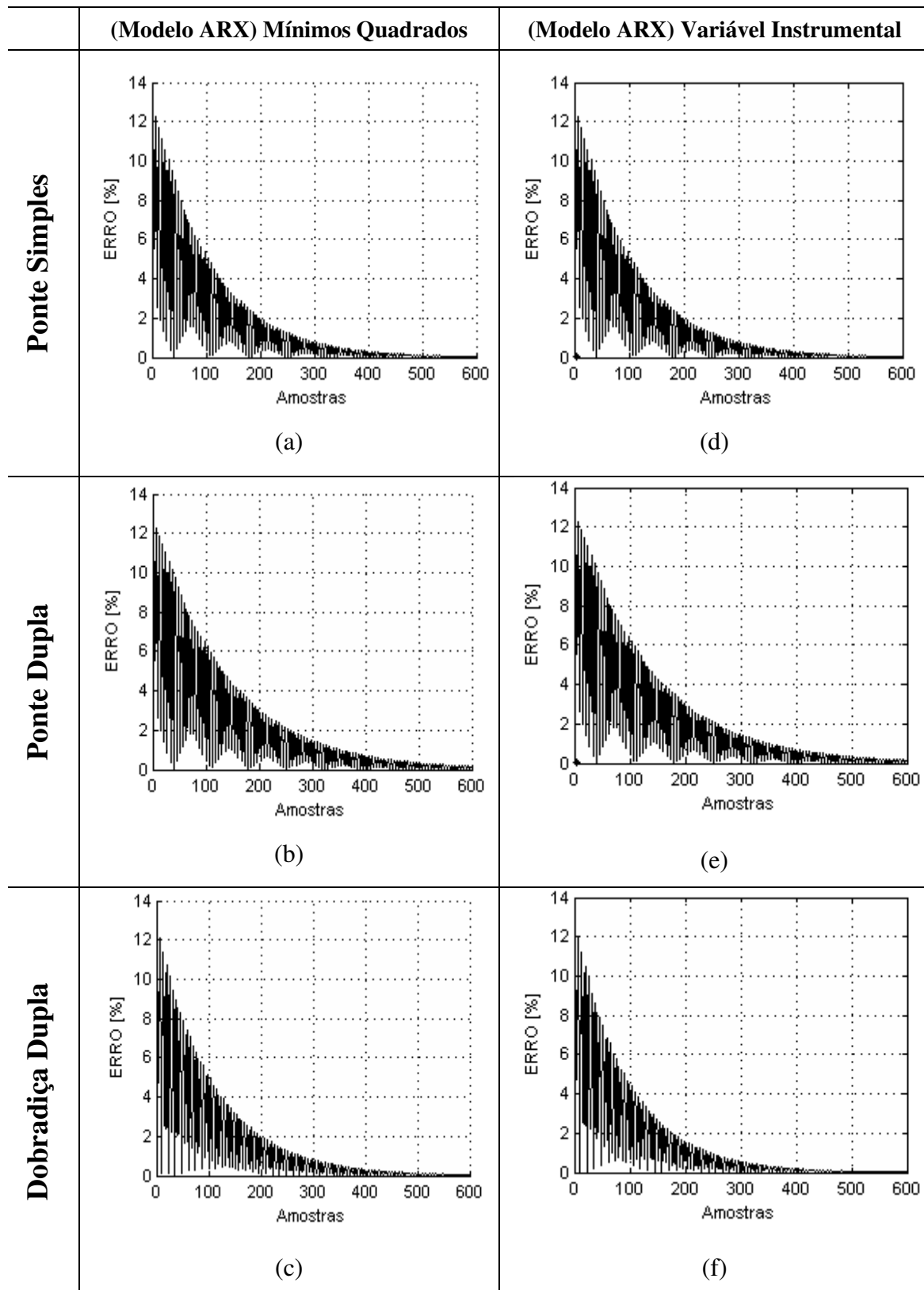


Figura 4.11: Erro Relativo **sem** ruído. ANSYS[®] *versus* RLS: (a) ponte simples, (b) ponte dupla, (c) dobração dupla. ANSYS[®] *versus* RIV: (d) ponte simples, (e) ponte dupla, (f) dobração dupla.

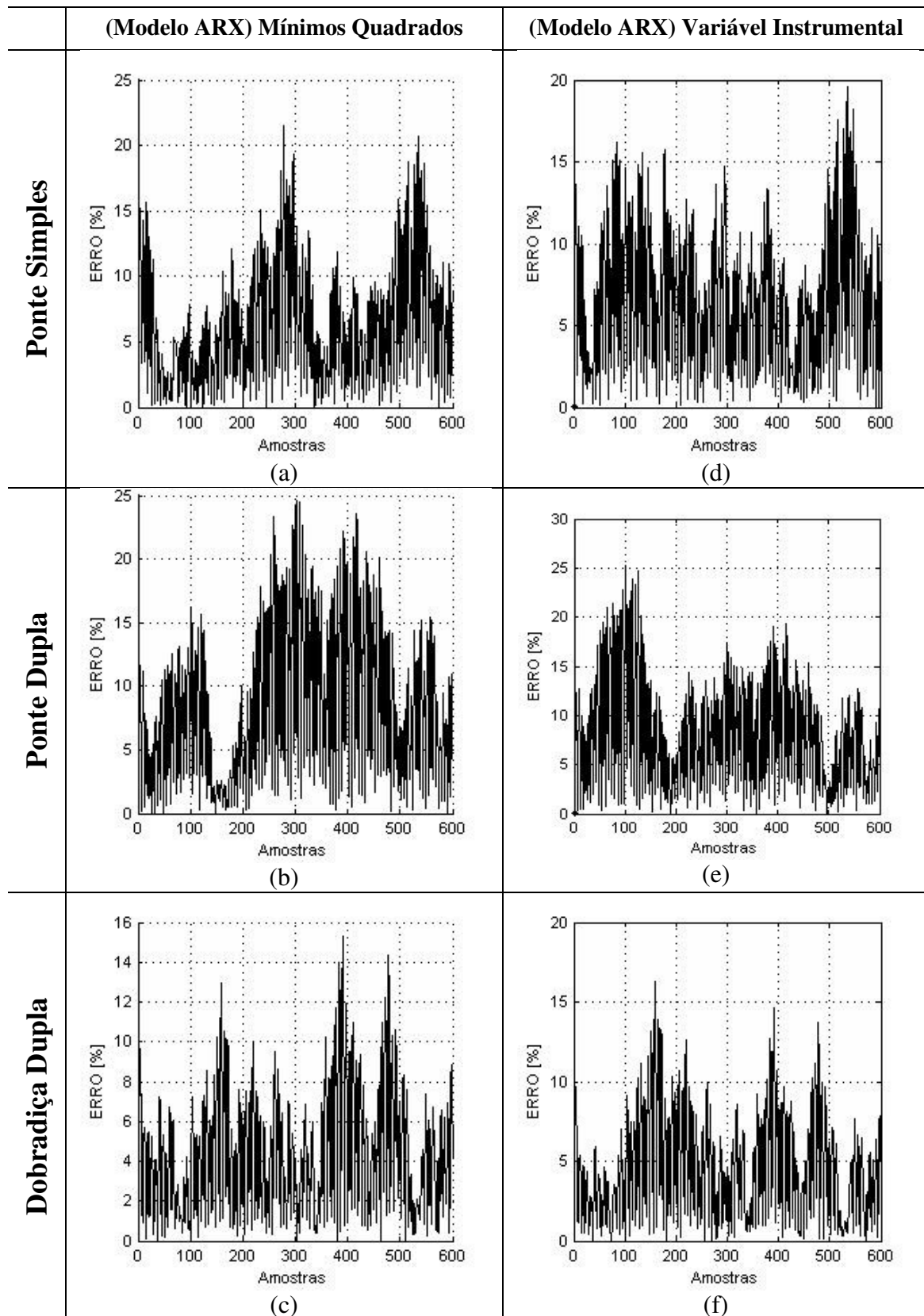


Figura 4.12: Erro Relativo **com** ruído. ANSYS[®] versus RLS: (a) ponte simples, (b) ponte dupla, (c) dobração dupla. ANSYS[®] versus RIV: (d) ponte simples, (e) ponte dupla, (f) dobração dupla.

O comportamento dos parâmetros característicos, obtido através dos estimadores RLS e RIV nos gráficos das Figura 4.11 e Figura 4.12, para as elasto-massas, apresenta dois aspectos quando analisado o erro relativo.

Em ambos os grupos de gráficos, se os dados não estão contaminados com ruído, claramente, distinguem-se os dois regimes de operação, o permanente e o transitório. No regime transitório o erro varia de 0 até 12%, o que é resultado da arbitragem inicial da matriz de covariância 'P_i'. Entretanto os testes demonstram que o valor atualmente atribuído é ótimo. No regime permanente o erro cai aproximadamente a menos de 2%, o que significa que a estrutura atingiu estabilidade. Observa-se, portanto, que os estimadores, apesar de não estarem sob ruído, comportam-se conforme esperado, visto que a Teoria de Sistemas considera que a estabilidade no regime permanente estabelece o critério de decisão.

Entretanto, quando os estimadores processam dados contaminados com ruído, como no caso da Figura 4.12, a forma do gráfico resultante não quer dizer que os estimadores não têm bom desempenho. Este resultado é o esperado em virtude da contaminação e se confirma ao se comparar o comportamento da plataforma de teste com o comportamento do sistema identificado. E se consolida ao obter o erro quadrático médio. Por outro lado, os gráficos não estão menos poluídos em virtude de ter-se utilizado ruído aleatório e não ruído branco, como é para o caso específico do RLS, o que não faz muita diferença para o estimador RIV. Mas ainda assim, tendo realizado os testes com ruído aleatório, o desempenho de ambos os estimadores mostrou-se satisfatório, pois o erro quadrático médio do deslocamento permaneceu praticamente o mesmo, conforme pode ser visto nas Tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9. Resumindo, os parâmetros identificados estão próximos dos parâmetros das estruturas de teste, tanto para dados contaminados como para dados não contaminados. O desempenho dos parâmetros identificados é ótimo, porque a raiz do erro quadrático médio 's' do deslocamento das três tipologias é menor que 3%, conforme os requisitos de projeto.

Outro resultado interessante é o tempo de execução na identificação dos parâmetros característicos de cada elasto-massa, os quais são mostrados na Tabela 4.10 e Tabela 4.11, onde 'Δt₁' é o tempo de execução do estimador com os dados lidos, e 'Δt₂' é o tempo de execução do estimador mais a leitura dos dados.

Tabela 4.10: Tempos de execução dos estimadores RLS e RIV (elasto-massa **sem** ruído).

Elasto-massa	Estimador RLS		Estimador RIV	
	Δt ₁ (s)	Δt ₂ (s)	Δt ₁ (s)	Δt ₂ (s)
Ponte Simples	0,297	0,344	0,328	0,351
Ponte Dupla	0,297	0,344	0,312	0,344
Dobradiça Dupla	0,297	0,344	0,313	0,359

Tabela 4.11: Tempos de execução dos estimadores RLS e RIV (elasto-massa **com** ruído).

Elasto-massa	Estimador RLS		Estimador RIV	
	Δt ₁ (s)	Δt ₂ (s)	Δt ₁ (s)	Δt ₂ (s)
Ponte Simples	0,282	0,328	0,297	0,313
Ponte Dupla	0,297	0,312	0,298	0,312
Dobradiça Dupla	0,266	0,329	0,297	0,328

De acordo aos dados apresentados nas Tabelas 4.10 e 4.11, pode-se estabelecer que a demora na identificação dos parâmetros característicos das estruturas teste equivale aproximadamente a 0,5s. Pois, cabe notar que a velocidade no processamento dos dados do RIV é maior quando comparada à do RLS. Tal fato se deve ao vetor instrumental, porquanto este acelera o processo de identificação.

4.6.2 Validação da síntese do projeto de atuadores eletrostáticos

Num segundo momento as elasto-massas, analisadas anteriormente, foram acopladas ao *comb-drive* resultando em três atuadores MEMS (ver Figura 4.2). Os ensaios obedeceram ao mesmo desenvolvimento das elasto-massas. Os resultados do processo sem a contaminação de ruídos são mostrados nas Tabela 4.12, Tabela 4.13 e Figura 4.13, deixando para um segundo momento à injeção de ruído junto ao sinal de excitação, sendo os resultados obtidos mostrados nas Tabela 4.14, Tabela 4.15 e Figura 4.14.

Tabela 4.12: ANSYS[®] versus ARX e estimador **RLS** (atuador **sem** ruído).

Parâmetros	Ponte Simples		Ponte Dupla		Dobradiça Dupla
ME-[kg]	$61,50 \times 10^{-12}$		$123,06 \times 10^{-12}$		$69,17 \times 10^{-12}$
D-[N s/m]	$0,0089 \times 10^{-6}$		$0,0180 \times 10^{-6}$		$0,0091 \times 10^{-6}$
k-[N/m]	0,6761		1.376		0,6761
s%	$0,0410 \times 10^{-6}$		$0,0240 \times 10^{-6}$		$0,0390 \times 10^{-6}$

Tabela 4.13: ANSYS[®] versus ARX e estimador **RIV** (atuador **sem** ruído).

Parâmetros	Ponte Simples		Ponte Dupla		Dobradiça Dupla
ME-[kg]	$61,53 \times 10^{-12}$		$123,06 \times 10^{-12}$		$69,21 \times 10^{-12}$
D-[N s/m]	$0,0092 \times 10^{-6}$		$0,0183 \times 10^{-6}$		$0,0093 \times 10^{-6}$
k-[N/m]	0,6763		1.3617		0,6762
s%	$0,0298 \times 10^{-6}$		$0,0240 \times 10^{-6}$		$0,0300 \times 10^{-6}$

Tabela 4.14: ANSYS[®] versus ARX e estimador **RLS** (atuador **com** ruído).

Parâmetros	Ponte Simples		Ponte Dupla		Dobradiça Dupla
ME-[kg]	$64,08 \times 10^{-12}$		$128,58 \times 10^{-12}$		$71,57 \times 10^{-12}$
D-[N s/m]	$0,0268 \times 10^{-6}$		$0,0580 \times 10^{-6}$		$0,0214 \times 10^{-6}$
k-[N/m]	0,6753		1.3761		0,6758
s%	$0,1217 \times 10^{-6}$		$0,0944 \times 10^{-6}$		$0,1067 \times 10^{-6}$

Tabela 4.15: ANSYS[®] versus. ARX e estimador **RIV** (atuador **com** ruído).

Parâmetros	Ponte Simples		Ponte Dupla		Dobradiça Dupla
ME-[kg]	$64,07 \times 10^{-12}$		$128,36 \times 10^{-12}$		$71,56 \times 10^{-12}$
D-[N s/m]	$0,0283 \times 10^{-6}$		$0,0505 \times 10^{-6}$		$0,0218 \times 10^{-6}$
k-[N/m]	0,6754		1.3612		0,6758
s%	$0,1104 \times 10^{-6}$		$0,0675 \times 10^{-6}$		$0,1104 \times 10^{-6}$

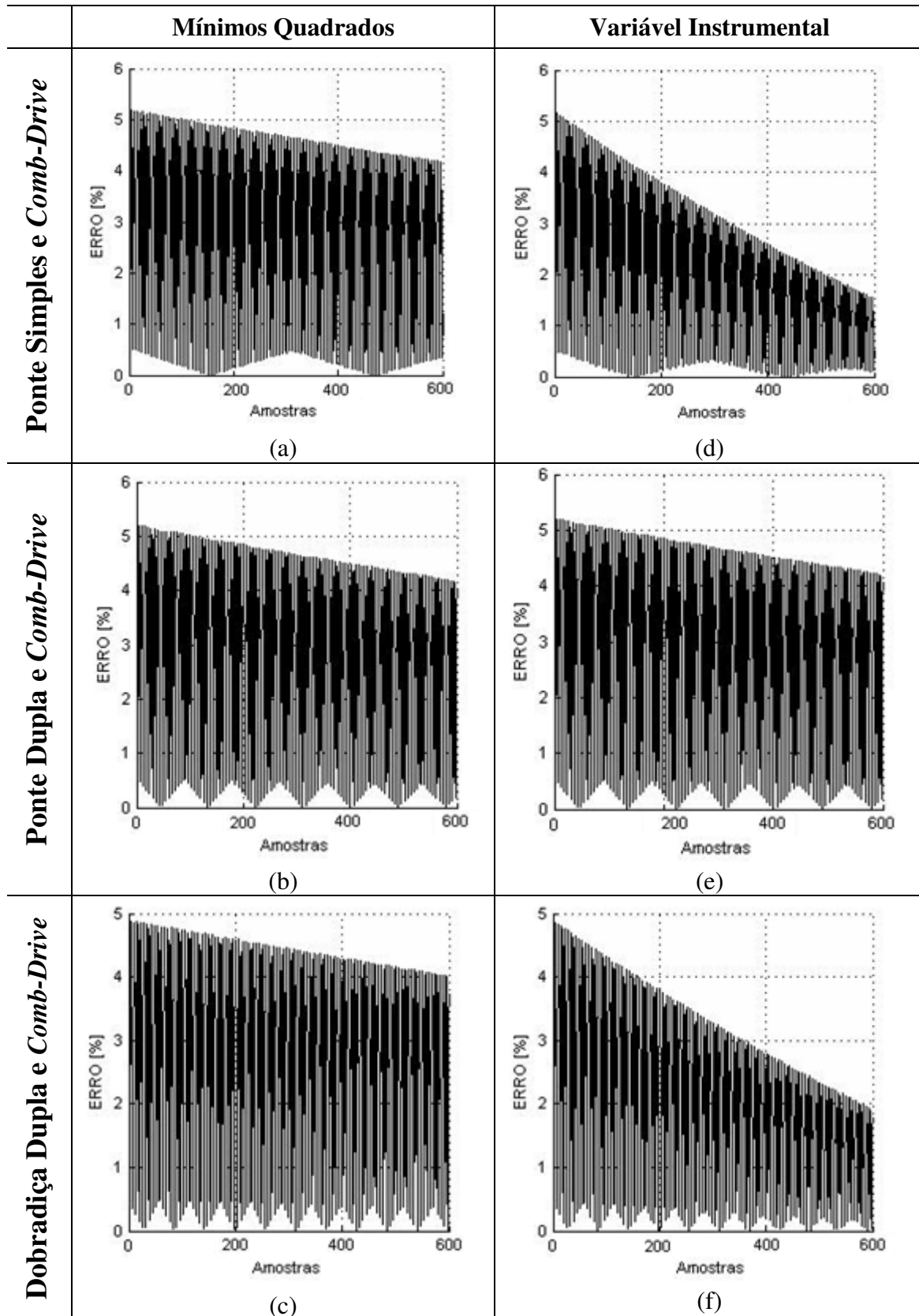


Figura 4.13: Erro relativo **sem** ruído do atuador. ANSYS[®] versus RLS: (a) ponte simples, (b) ponte dupla, (c) dobradiça dupla. ANSYS[®] versus RIV: (d) ponte simples, (e) ponte dupla, (f) dobradiça dupla.

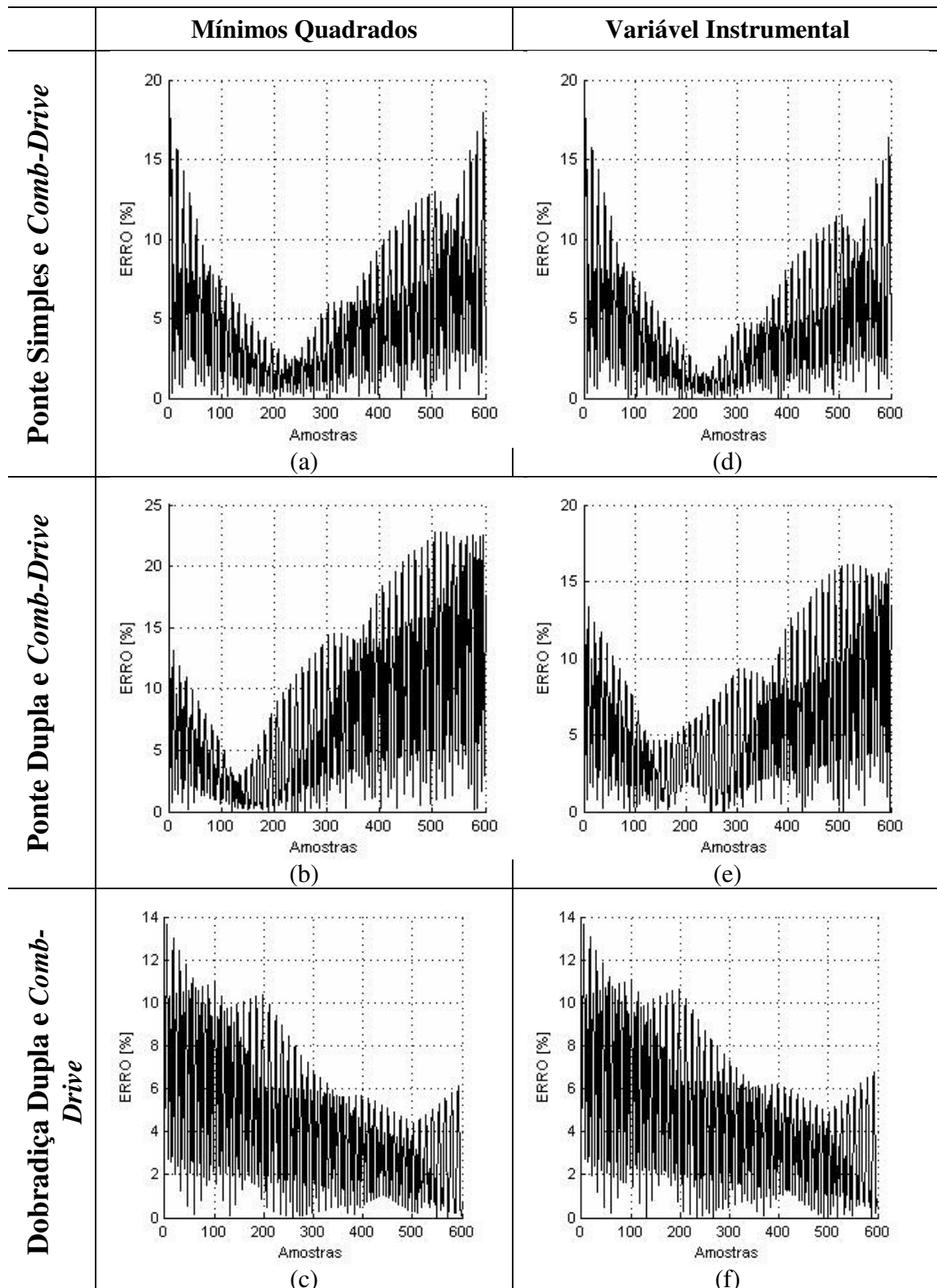


Figura 4.14: Erro relativo **com** ruído dos atuadores. ANSYS[®] versus RLS: (a) ponte simples, (b) ponte dupla, (c) dobração dupla. ANSYS[®] versus RIV: (d) ponte simples, (e) ponte dupla, (f) dobração dupla.

Cabe observar que o erro relativo obtido entre os estimadores RLS, RVI e os atuadores eletrostáticos, mostrada nos gráficos das Figura 4.13 e Figura 4.14, apresentam comportamento semelhante ao das elasto-massas. Quando os dados dos sinais de saída não estejam contaminados com ruído (ver Figura 4.13), claramente não é distinguível o intervalo, no qual cada regime de operação predomina como sucedeu no caso das elasto-massas. Por outro lado, cabe observar que, o erro relativo diminuiu em amplitude para os atuadores eletrostáticos MEMS. Isto pode estar sucedendo devido ao potencial de 25V necessário para gerar uma força eletrostática de $1,6 \times 10^{-6} \text{N}$. A diferença de amplitudes para essas duas grandezas é razoável, o que definitivamente provocou um erro relativo não maior a 5,5% para ambos os estimadores neste caso.

Por outro lado, com os dados contaminados observa-se que o erro aumentou (conforme Figura 4.14). Isto pode ser resultado de ter usado uma faixa de amplitude no sinal de erro aleatório proporcional à utilizada nos testes das elasto-massas. Porém, ao verificar o erro quadrático médio constata-se que os estimadores conseguem obter os parâmetros característicos do atuador (Tabela 4.14 e Tabela 4.15). Com relação à matriz de covariância ' P_i ' pode-se dizer que os mesmos comentários feitos para as elasto-massas também são válidos para os atuadores. Resumindo, os parâmetros identificados para os atuadores eletrostáticos estão próximos aos parâmetros das estruturas de teste, tanto para os dados contaminados quanto para os dados não contaminados.

Similar às elasto-massas, outro resultado interessante é o tempo de execução na identificação dos parâmetros característicos de cada atuador, os quais são mostrados nas Tabelas 4.16 e 4.17.

Tabela 4.16: Tempos de execução dos estimadores RLS e RIV (atuador **sem** ruído).

Atuador	Estimador RLS		Estimador RIV	
	Δt_1 (s)	Δt_2 (s)	Δt_1 (s)	Δt_2 (s)
Ponte Simples	0,703	0,734	0,750	0,813
Ponte Dupla	0,703	0,765	0,750	0,797
Dobradiça Dupla	0,703	0,766	0,750	0,813

Tabela 4.17: Tempos de execução dos estimadores RLS e RIV (atuador **com** ruído).

Atuador	Estimador RLS		Estimador RIV	
	Δt_1 (s)	Δt_2 (s)	Δt_1 (s)	Δt_2 (s)
Ponte Simples	0,281	0,328	0,282	0,328
Ponte Dupla	0,281	0,328	0,297	0,312
Dobradiça Dupla	0,281	0,328	0,297	0,329

De acordo com os dados apresentados nas Tabelas 4.16 e 4.17, pode-se estabelecer que a demora na identificação dos parâmetros característicos dos atuadores teste quando utilizados os estimadores RLS e RIV que o desempenho do RIV é eficiente e eficaz quando comparado ao RLS. Deve ser levado em consideração que o melhor desempenho do RIV é quando este trabalha sob ruído branco conforme a teoria estabelece, entretanto, para as condições de ruído impostas nos testes realizados apresenta desempenho satisfatório.

Como principais pontos a favor da identificação “caixa-cinza” neste trabalho destacam-se: (a) a diminuição do número de parâmetros; (b) maior capacidade de reproduzir características fora dos dados de identificação; e, (c) maior robustez. O que satisfaz as expectativas. O uso de informação auxiliar se deu principalmente nas etapas (1) seleção de estrutura e (2) estimação de parâmetros. A forma com que as informações foram incorporadas dependeu do tipo de representação escolhida, neste caso, o modelo ARX.

Os resultados dos testes de validação do modelo matemático identificado indicaram que é capaz de explicar adequadamente a dinâmica linear contida nos dados, pois não foram detectadas correlações significativas nos resíduos de identificação. Também foi obtido o desempenho satisfatório do sinal degrau quando se incorporou ruído ao mesmo. No sistema simulado observou-se que o uso de informação de ganho no estado estacionário na estimação de parâmetros possibilitou ao modelo, além de uma melhor aproximação desta característica, uma melhor aproximação da função "constante de tempo" do sistema original. Conseqüentemente, as expectativas da proposta neste trabalho são satisfatórias.

5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta considerações gerais sobre objetivos propostos, relata e comenta os resultados obtidos no decorrer do seu desenvolvimento, e, finalmente, propõe uma seqüência organizada de assuntos a serem desenvolvidos como futuros trabalhos de pesquisa.

*“Ninguém está proibido de fazer melhor do que eu.”
Martinho Lutero (1483-1546).*

5.1 Considerações Finais

O objetivo proposto neste estudo foi alcançado.

Os estimadores recursivos RLS e RIV apresentam elevada probabilidade de contribuição na diminuição do custo e aumento da qualidade dos MEMS. A redução no custo é evidente, pois a demora na identificação dos parâmetros corresponde, aproximadamente, no melhor dos casos a 0,3s e no pior a 0,5s. Se os testes realizados com os estimadores forem executados na produção, a qualidade dos MEMS consolidar-se-á, pois o teste em lote (batch) tende a ser descartado uma vez que cada unidade produzida poderá ser testada.

O modelo estocástico quando comparado com o modelo determinístico permite obter um erro quadrático médio menor que $0,5 \times 10^{-6} \%$ para ambos os estimadores recursivos RLS e RIV. Os testes de detecção de defeitos podem vir a melhorar a etapa de projeto.

Os estimadores RLS e RIV satisfazem a interação com as minúsculas dimensões dos MEMS, tornando-se identificadores não invasivos para a determinação dos parâmetros característicos desses.

Cabe salientar, também, que o modelo ARX e os estimadores RLS e RIV não são inovadores; porém a forma como é conduzido este estudo investigativo é inédita, uma vez que permite validar os resultados de projeto a partir de qualquer ferramenta computacional (CAD).

Por outro lado, deixa a desejar a comparação dos resultados obtidos no presente trabalho com os de outros autores, pois as estruturas selecionadas para a realização deste estudo não compartilham da mesma tipologia e da mesma finalidade que as encontradas na literatura.

5.2 Resultados

O desenvolvimento dos tópicos que estruturam este trabalho provocou algumas reflexões.

A experiência na realização do presente trabalho mostrou que ainda há muito a se investigar dentro do universo dos MEMS. Organizar um banco de dados de forma a promover uma ampla visão das necessidades com as quais os MEMS se deparam é urgente. Entretanto, pode afirmar-se que os esforços científicos redundam sobre um único aspecto, diminuir o custo dos MEMS. Cabe salientar que a literatura científica não mostra como é estabelecido o custo da fase de projeto e caso seja, quais são os valores atribuídos em cada uma das atividades concernentes. O mesmo pode ser dito com relação ao tempo, onde as médias estabelecidas para o processo todo e para atividades específicas não se destacam.

No Capítulo 2, cabe destacar a falta de normas regentes, principalmente, para os atuadores eletrostáticos. Outro ponto a destacar é a necessidade de testes virtuais, tanto para identificar defeitos, como para simular falhas. A identificação de sistemas, num primeiro momento, mostra-se uma excelente alternativa para detectar defeitos, porque dispõe de ampla gama de métodos com redutores de ordem otimizados.

No caso do Capítulo 3, apresenta-se a evolução nos níveis de projeto. Cabe ressaltar que a literatura científica apresenta a simulação e a verificação como processos independentes, porém este trabalho mostra que estão intimamente relacionados. Talvez seja necessário estabelecer como essa verificação se realiza propriamente. É o caso da extração e da identificação não diferenciadas na literatura científica, ou favorecendo unicamente o caso de extração.

Finalmente, o Capítulo 4 permitiu compreender que, na identificação “caixa cinza”, dois aspectos são importantes. O primeiro é a obtenção dos dados, o qual obedece a critérios bem estabelecidos; porém, por ser uma área recente em aplicação, ainda depende da arte do projetista. O segundo aspecto consiste no tratamento de dados para a obtenção dos parâmetros característicos. Detectou-se a necessidade de normalizar os dados de entrada de forma a permitir que a técnica tenha ótimo desempenho na identificação, pois o modelo responde melhor quando o sinal de excitação degrau é unitário. Porém, este fato não pode ser generalizado. Entretanto, nada impede que o método utilizado no projeto possa também ser usado na produção, após fabricação e encapsulamento.

Em suma, as contribuições científicas deste trabalho são:

- (a) Estudo e compilação do ciclo de vida dos atuadores MEMS baseados em deformação elástica e eletrostática.
- (b) Análise crítica da etapa de projeto de MEMS.
- (c) Modelo “caixa cinza” como modelo matemático para MEMS.
- (d) Nova proposta no projeto de MEMS: estimadores recursivos são uma alternativa à realização de testes virtuais.
- (e) Otimização do algoritmo dos estimadores RLS e RIV: normalização dos dados de entrada.
- (f) Implementação de plataforma computacional integrando ANSYS® e

MATLAB[®].

- (g) Desenvolvimento textual de ensaios virtuais para implementação em ferramentas de CAD.

5.3 Propostas para Continuação do Trabalho

Para prosseguir e aperfeiçoar este trabalho propõem-se os seguintes temas de investigação:

- Estudar com maior profundidade a utilização dos elementos TRANS126, TRANS109 e ROM144 do ANSYS[®], já que a informação disponível é escassa (SWANSON, 1998). Isto impede comparar o desempenho desses elementos com MEMS. A motivação pode resultar no desenvolvimento de um dispositivo ROM (*Reduce Order Model*).

- Investigar a possibilidade de incorporar, no aplicativo ANSYS[®], geradores de ruído branco ou sinais pseudo-aleatórios, de forma a utilizar outros estimadores que apresentem melhor desempenho quando submetidos àqueles. Entretanto, esse aplicativo deve ser desenvolvido de forma que possa ser utilizado e executado em CADs para o desenvolvimento do projeto de MEMS.

- Aplicar o modelo discreto ARMAX com outros estimadores baseados no método dos mínimos quadrados, de forma a enriquecer o material técnico-científico disponibilizado para a obtenção do modelo linear de MEMS através da Identificação de Sistemas.

- Utilizar a Identificação de Sistemas para obter o modelo não-linear dos atuadores MEMS. A maior dificuldade está na construção do vetor de regressores, pois é um processo que consiste na seleção manual de funções que fazem parte do sinal de saída. É um processo tedioso e complexo. A solução é automatizar a escolha dos componentes do sinal de entrada que apresentem maior influência no comportamento não-linear dos atuadores eletrostáticos. Simultaneamente, propõe-se investigar a eficiência desta solução.

- Este trabalho, ao utilizar modelagem matemática discreta, empregou operadores que mostram explícita dependência com relação ao tempo. Uma forma de descrever os modelos discretos é através do operador deslocamento unitário 'q'. Entretanto, esse operador possui a desvantagem de não ter correspondência com o operador d/dt . Por tal motivo, é proposto utilizar-se o operador delta (δ), o qual apresenta melhor correspondência entre o tempo contínuo e o tempo discreto. Este fato desperta a curiosidade em aplicá-lo a futuros trabalhos de investigação.

- Discutir o ciclo de vida, os conceitos dos termos “*Project*” e “*Design*” e constatar a similaridade com os termos “Projeto” e “Desenho” se faz necessário. Isto vem a proporcionar um novo conceito na arquitetura dos CADs para o desenvolvimento em MEMS. É premente uma revisão profunda dos termos utilizados e contrastar os conceitos para convencionar o significado dos mesmos em nível nacional, quando se refere a MEMS.

REFERÊNCIAS

- ACHICHE, S.; FAN, Z.; BOLOGNINI, F. Review of Automated Design and Optimization of MEMS. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, ISIE, 2007, Vigo, Spain. **Proceedings...**[S.I.]: IEEE, 2007. p. 2150-2155.
- AGILENT TECHNOLOGIES. **The Fundamental of Modal Testing**. New York , 2008.
- AGUIRRE, L. A. **Introdução a Identificação de Sistemas: técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais**. 2^o.ed. Belo Horizonte : UFMG, 2004.
- BAIDYA, B.; GUPTA, S. K.; MUKHERJEE, T. An extraction-based verification methodology for MEMS. **Journal of Microelectromechanical Systems**, [S.I.], v.11, n.1., p. 2-11, 2002.
- BARCELLOS, J. **Albert Einstein - História e pensamento político**. Porto Alegre : Secretaria Estadual da Cultura, 2002.
- BECK, C. G.; BAIOTTO, A. C.; ZORZAL, F. M. B. A aceleração da evolução e o desenvolvimento sustentável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande, MS. **Anais...** Campo Grande: ABES, 2005. p. 1-5.
- BERTALANFFY, L. V. **Teoria Geral dos Sistemas: fundamentos, desenvolvimento e aplicações**. [S.I.], Vozes, 1968.
- BOZKURT, A.; TOSCANO, P.; LAL, A. Mesoscale Microdroplet Based Combustion Power Generation using an Ultrasonic Droplet Generator. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON MICRO AND NANOTECHNOLOGY FOR POWER GENERATION AND ENERGY CONVERSION APPLICATION, 6., 2006, Berkely, CA. **Anais...** Berkeley: PowerMEMS, 2006. p. 5-8.
- BRETON, P. **História da Informática**. São Paulo : Universidade Estadual Paulista, 1991.
- BRINKMAN, W. F.; HAGGAN, D. E.; TROUTMAN, W. W. History of the invention of the transistor. **Journal of Solid-State Circuits**, [S.I.], v. 32, n. 12, p. 1858-1865, 1997.
- BRYZEK, J. Nano: The Emerging Science of Nanotechnology: Remaking the world-Molecule by Molecule. **Spectrum, IEEE**, v. 33, n.6, p. 0-8, 1996.
- CAI, J.; WANG, H.; WANG, S.; WU, X.; REN, T.; JIA, S. A study on packaging of PZT MEMS microphone. **Electronic Components and Technology**, IEEE, v. 2, n. 31, p. 1077-1080, 2005.

CALIS, M.; LAGROUCHE, O.; DESMULLIEZ, M.P.Y. Modelling MEMS structures using Cosserat theory. **Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, IEEE, Nice**, p. 77-79, 2008.

CANAL, A. P. Métodos de Resolução de Sistemas Lineares: paralelização em um ambiente com memória distribuída. In: SEMANA ACADÊMICA DO PPGC, 4., 1999, **Anais...** Porto Alegre: PPGC da UFRGS, 1999. p. 327-331.

CHUA, G. H. **System Identification of Synchronous Machines**. 2002. Tese. School of Information Technology and Electrical Engineering, University of Queensland, 2002.

CIGADA, A.; LEO, E.; VANALI, M. Electrical method to measure the dynamic behaviour and the quadrature error of a MEMS gyroscope sensor. **Sensors and Actuators A**, Lausanne, v. 134, p. 88-97, 2007.

CORRÊA, M. V. **Identificação Caixa-Cinza de Sistemas Não-Lineares Utilizando Representações NARMAX Polinomiais e Racionais**. 2001. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

COURTOIS, B. Access to microsystem technologies: the MPC services solution. **Microelectronics Journal**. v. 1, n. 4, p. 407-417, 1997.

DAO, D. V. Six-degree of Freedom Micro Force-moment Sensor for Application in Geophysics. In: THE IEEE INT'L CONFERENCE ON MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS, MEMS, 2002, Las Vegas, USA, **Proceedings...**[S.I.]: IEEE, 2002, p. 312-315.

DE, S. K.; ALURU, N. R. Full-Lagrangian Schemes for Dynamic Analysis of Electrostatic MEMS. **Journal of Microelectromechanical Systems**, [S.I.], v.13, n.5, p. 737-758, 2004.

DEL TIN, L. **Reduced-order Modelling, Circuit-level Design and SOI Fabrication of Microelectromechanical Resonators**. 2007. Tese. Università degli Studi di Bologna, Facoltà di Ingegneria, Bologna, Itália, 2007.

DEMARTINI, B. Modeling of Parametrically Excited Microelectromechanical Oscillator Dynamics with Application to Filtering. In: IEEE CONFERENCE ON SENSORS, 4, 2005, Irvine, USA. **Proceedings...**[S.I.]: IEEE, 2005.

DENG, Y. M.; LU, W. F. Performance-Driven Microfabrication-Oriented Methodology for MEMS Conceptual Design with Application in Microfluidic Device Design. **MITLibraries**, DSpace Janeiro de 2005. Disponível em: <<http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/7460>>. Acesso em: Out 2008.

DEWEY, A.; SRINIVASAN, V.; ICOZ, E. Visual modeling and design of microelectromechanical system transducers. **Microelectronics Journal**, v.32, 2001.

DOREY, A. P.; MOORE, J. H. **Advances in actuators**. London : Institute of Physics, 1995.

EHRFELD, W. LIGA process: sensor construction techniques via X-ray lithography. In: IEEE SOLID-STATE SENSOR AND ACTUATOR WORKSHOP, 1998, Hilton Head Island, USA. **Proceedings...**[S.I.]: IEEE, 1998, p. 1-4.

EYKHOFF, P. **System Identification**. New York : John Wiley & Sons, 1974.

FEDDER, G. K. Structured Design of Integrated MEMS. In: INTERNATIONAL MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEM CONFERENCE, 12., 1999. **Proceedings...**[S.I.]: IEEE, 1999, p. 1-8.

FERNHOLZ, G. Roadmaps em MEMS/MST: o que eles oferecem e em que direção eles estão indo? **MINAPIM – A Revista de Micro e Nanotecnologia do Pólo Industrial de Manaus**. SUFRAMA – Super Intendência da Zona de Manaus, 2006. Disponível em: <<http://www.suframa.gov.br/minapim/news/visArtigo.cfm?Ident=29&Lang=BR>>. Acesso em: Ago 2006.

FEYNMAN, R. P. Infinitesimal machinery. **Journal of Microelectronmechanical Systems**, v.2, n.1, p. 4-14, 1993.

FEYNMAN, R. P. There's plenty of room at the bottom. **Journal of Microelectronmechanical Systems**, v.2, n.1, p. 60-66, 1992.

FINCH, N.; HE, J.; MARCHETTI, J. General MEMS process physics simulation and its application. In: MICROMACHINING AND MICROFABRICATION PROCESS TECHNOLOGY CONFERENCE, 6., 2000, Santa Clara, U.S.A. **Anais...** Bellingham: SPIE, 2000. v. 4174.

FLUITMAN, J. Microsystems technology: objectives. **Sensors and Actuators A**, Lausanne, v.56, p.151-166, 1996.

FUJITA, H. Future of actuators and microsystems. **Sensors and Actuators A**, Lausanne, v.56, p.105-111, 1996.

FUNK, J. SESES: a comprehensive MEMS modelling system. In: IEEE WORKSHOP ON MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS, 1994, Oiso, Japan. **Proceedings...**[S.I.]: IEEE, 1994, pp. 22-27.

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Mecânicos**. São Paulo : EDUSP - EDITORA DA USP, 1997.

GAD-EL-HAK, M. **The MEMS Handbook**. Boca Raton : CRC Taylor & Francis, 2002.

GILLES, K. **Mems in Medicine**. Allflex Flexible Printed Circuits, Out 2008. Disponível em: <<http://www.allflexinc.com/>>. Acesso em: Nov 2008.

HAGA, Y.; ESASHI, M. Biomedical microsystems for minimally invasive diagnosis and treatment. **Proceedings of the IEEE**, v.92, n.1, p. 98-114, 2004.

HARONIAN, D. Maximizing microelectromechanical sensor and actuator sensitivity by optimizing geometry. **Sensors and Actuators A**. Lausanne, v.50, p. 223-236, Oct 1995.

HARSÁNYI, G. An internet course for teaching basic MEMS technologies and applications: MEMSEdu. In: ELECTRONIC COMPONENTS AND TECHNOLOGY CONFERENCE. **Proceedings...**2005, p. 1935-1942.

HASSUL, M.; SHAHIAN, B. Frequency domain identification for undergraduates. **IEEE Transaction on Education**, v.34, n.4, p. 368-375, 1992.

HAVEL, T. F. **Towards an Industrial Ecosystem for Power MEMS**. Portland Oregon : Massachusetes Institute of Technology, 2007.

HE, Y.; MARCHETTI, J.; MASEEH, F. MEMS Computer-aided Design. In: EUROPEAN DESIGN & TEST CONFERENCE, 1997, Paris, France. **Proceedings...**1997. p. 1-5.

HEALY, D. **MicroSystems, Complexity, and the adaptative battlefield.** DARPA Tech, 2005, p. 136-141.

HERDIER, R. Piezoelectric thin films for MEMS applications: A comparative study of PZT, 0.7PMN–0.3PT and 0.9PMN–0.1PT thin films grown on Si by r.f. magnetron sputtering. **Sensors and Actuators A: Physical.** v.148, p. 122-128, 2008.

HIEKE, A. APDL Implementation of a 3D FEM capacitance simulator for arbitrarily shaped interconnects. **Journal of Modeling and Simulations of Microsystems,** v.1, n.1, p. 91-104, 1999.

HORNBECK, L. J. **Digital Light Processing and MEMS: Timely Convergence for a Bright Future.** Texas Instruments Inc, 2008. Disponível em : <http://focus.ti.com/download/dlpdmd/115_Digital_Light_Processing_MEMS_Timely_Convergence.pdf>. Acesso em: Nov 2008.

HUNG, E. S.; YANG, Y-Y.; SENTURIA, S. Low-Order Models for Fast Dynamical Simulation of MEMS Microstructures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID STATE SENSORS AND ACTUATORS, 1997, Chicago, U.S.A. **Proceedings...**[S.I]: IEEE, 1997. p. 1101-1104.

IZHAM, Z.; WARD, M. C. L. Dynamic simulation of a resonant MEMS magnetometer in Simulink®. **Sensors and Actuators A,** v. 115, n. 2-3, p. 392-400, Sep 2004.

JAECKLIN, V. P.; LINDER, C.; ROOIJ, N. J. Novel poly silicon comb actuator for xy-stages. In: MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS, MEMS '92, 1992, Travemunde, Germany. **Proceedings...**[S.I]: IEEE, 1992. p. 147-149.

JOHNSTONE, R. **Automated Design for Micromachining.** Simon Fraser University, 2006. Disponível em: <www.sfu.ca/immr/gallery/actuators.html>. Acesso em: Nov 2008.

JUDY, J W. **Biomedical Applications of Mems.** University of California, Los Angeles, 2000. Disponível em : <<http://www.ee.ucla.edu/~jjjudy/>>. Acesso em: Nov 2008.

KAMALIAM, R.; AGONINO, A. M.; TAKAGI, H. The Role of Constraints and Human Interaction in Evolving MEMS Designs: Microresonator Case Study. In: DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCE, DETC/DAC, 2004, Salt Lake City, USA. **Proceedings...**2004. p. 1-9.

KAMALIAN, R.; ZHOU, N.; AGOGINO, A. M. A Comparison of MEMS Synthesis Techniques. In: Pacific RIM WORKSHOP ON TRANSDUCERS AND MICRO/NANO TECHNOLOGIES, 2002, Xiamen, China. **Proceedings...**2002. p. 239-242.

KILBY, J. S. The integrated circuit's early history. **Proceedings of the IEEE,** v. 88, n.1, p. 109-111, 2000.

KUMAR, R.V.R, MISHRA, A. Block algorithms for the parametric estimation of signals and systems. **Vision, Image and Signal Processing IEE Proceedings.** v.144, n.4, p. 257-259, 1997.

KURZWEIL, R. **The Age of Spiritual Machines.** 1a. New York : Viking Adult, 1999.

LANG, W. Reflexions on the future of microsystems. **Sensors and Actuators A,** v. 72, p. 1-15, 1999.

LI, H.; ANTONSSON, E. K. Evolutionary Techniques in MEMS Synthesis. In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, ASME, 1998, Anaheim, U.S.A. **Proceedings...**1998.

LIENEMANN, J. **Complexity reduction techniques for advanced MEMS actuators simulations**. 2006. Tese. Institut für Mikrosystemtechnik, Freiburg, 2006.

LIN, L.; HOWE, R.; PISSANO, A. P. Microelectromechanical filters for signal processing. **Journal of Microelectromechanical Systems**. v. 7, n.3, p. 286-294, 1998.

LIN, R. M.; WANG, W. J. Structural dynamics of microsystems - current state of research and future directions. **Mechanical Systems and Signal Processing**. v. 20, p. 1015-1043, 2006.

LITOVSKI, V.; ANDREJEVIC, M.; ZWOLINSKI, M. Behavioural Modelling, Simulation, Test and Diagnosis of MEMS using ANNs. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS, 2005, Kobe, Japan. **Proceedings...**[S.I.]: IEEE, 2005. p. 5182-5185.

LIU, C.; BAR-COHEN, Y. Scaling laws of microactuators and potential applications of electroactive polymers in MEMS. In: ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS, SPIE's, 1999, Newport Beach, U.S.A. **Proceedings...**1999. p. 1-10.

LJUNG, L. Development of System Identification. In: 13TH WORLD CONGRESS OF IFAC, 1996, San Francisco, U.S.A. **Proceedings...**1996. p. 141-146.

LJUNG, L. **System Identification, Theory for User**. New Jersey : Prentice Hall, 1987.

LOBONTIU, N.; GARCIA, E. Two microcantilever designs: lumped-parameters model for static and modal analysis. **Journal of Microelectromechanical Systems**. v.13, n.1, p. 41-50, Feb 2004.

LOPES, J. L. **A estrutura quântica da matéria**. 2a. Rio de Janeiro: UFRJ, 1993.

MADOU, M. J. **Fundamentals of Microfabrication. The Science of Miniaturization**. 2a. ed. Florida : CRC Press, 1997.

MARTINS, P. R. **Nanotecnologia, Sociedade e Meio Ambiente**. São Paulo : Xamã, 2006.

MASEEH, F.; HARRIS, R. M.; SENTURIA, S. D. A CAD Architecture for Microelectromechanical Systems. In: An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots, 1990, Napa Valley, U.S.A. **Proceedings...**[S.I.]: IEEE, 1990, p. 44-49.

MINIPAN. The Micro and Nano Technology Magazine for Latino America. **MINIPAN News**. SUFRAMA - Superintendece of the Manaus Free Trade Zone, Feb de 2006. Disponível em: <www.suframa.gov.br/minapim/news/visArtigo.cfm>. Acesso em: Ago 2008.

MIR, S.; CHARLOT, B.; COURTOIS, B. Extending fault-based testing to microelectromechanical systems. **Journal of Electronic Testing: Theory and Applications**. v. 16, p. 279-288, 2000.

MONZÓN, I. L. Una aproximación a los sistemas microelectromecánicos. **Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones**, v. XXIV, n. 3, p. 10-15, 2003.

- MUKHERJEE, T.; IYER, S. V.; FEDDER, G. Optimization-based synthesis of microresonators. **Sensors and Actuators A**. p. 118-127, Oct 1998.
- MUKHERJEE, T.; ZHOU, Y.; FEDDER, G. Hierarchical Mixed-Domain Circuit Simulation, Synthesis and Extraction Methodology for MEMS. **Journal of VLSI Signal Processing Systems**. v. 21, n. 3, p. 233-249, 1999.
- NASH, W. A. **Resistência dos Materiais**. São Paulo: McGraw-Hill, 1976.
- NEPOMUCENO, E. G. **Identificação Multiobjetivo de Sistemas Não-Lineares**. 2002. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.
- NGUYEN, C. T. Micromechanical resonators for oscillators and filters. In: INTERNATIONAL ULTRASONIC SYMPOSIUM, 1995, Seattle, USA. **Proceedings...** [S.I.]: IEEE, 1995, p. 489-499.
- NGUYEN, H. A Novel MEMS Tunable Capacitor Based On Angular Vertical Comb Drive Actuators. In: SOLID-STATE SENSOR, ACTUATOR AND MICROSYSTEMS WORKSHOP, 2002, Hilton Head Island, U.S.A. **Proceedings...**2002. p. 277-281.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. Rio de Janeiro : Prentice Hall do Brasil Ltda., 1993. p. 781.
- PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia: microestrutura e propriedades**. São Paulo : HEMUS, 1997. p. 349.
- PEREIRA, E. T. **Atenção visual Bottom-Up guiada por otimização via algoritmos genéticos**. 2007. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Campina Grande, 2007.
- PLAZA, J. A.; ESTEVE, J.; SAUL, C. K. **Sensores y Microsistemas**. v.1. Buenos Aires: Liliana B. Fraigi, 2004.
- POLOSKY, M. A.; GARCIA, E. **Microsystem product development**. Laboratories Sandia. Italy : TIMA Editions/DTIP, 2006.
- PORTELA, A.; SILVA, A. **Mecânica dos materiais**. Lisboa : Plátano, 1996. p. 334.
- POTTMANN, M. P. Block-oriented NARMAX models with output multiplicities **AIChE Journal**, v.44, n.1, p. 131-140, 1998
- PRESTON, J. M.; WERNER, F. M. SUFRAMA - Superintendência da Zona Franca de Manaus. **Minapim News**. Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Maio de 2008. Disponível em: <<http://www.suframa.gov.br/minapim/news/buscaConc.cfm?idArt=280&lang=BR>>. Acesso em: Out 2008.
- REIMBOLD, M. M. P. **Ajuste da taxa de falhas de CI's monolíticos em regime de operação discreto ("ON-OFF") na MIL-HDBK-217**. 1994. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1994.
- REYES, D. R. Micro Total Analysis Systems-Introduction, Theory, and Technology. **Analytical Chemistry**, v. 74, n.12, p. 2623-2636, June 12, 2002.
- RIBAS, R. P. **Microsistemas Integrados (MEMS)**. Universidade Estadual de Campinas, 2000. Disponível em: <<http://www.ccs.unicamp.br/cursos/fee107/download/cap14.pdf>>. Acesso em: Nov 2008.

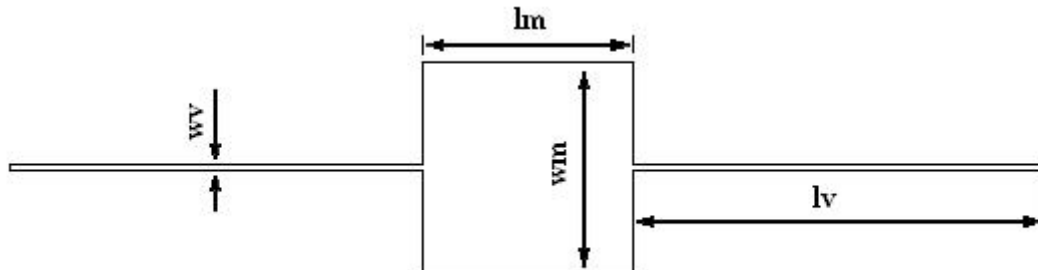
- RUDNYI, E.; KORVINK, J. G. Model order reduction for large scale finite element Engineering Models. In: European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CDF, 2006, P. Wesseling, Netherland. **Proceedings....Delft The Netherland, 2006.** p. 1-8.
- RUYER, R. **A Cibernética e a Origem da Informação.** 1a. São Paulo : Paz e Terra, 1972.
- DE LOS SANTOS, H. **Introduction to microelctromechanical MEM microwave systems.** Boston: Artech House, 1999.
- SCHMALZEL, J. An Architecture for intelligent systems based on smart sensor. In: Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC, 2004, Como, Italy. **Proceedings....p. 71-75.**
- SEIDEL, H. Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions. **Journal of Electrochemical Society**, v. 131, n.1, p. 126, Jan 1984.
- SENTURIA, S. D. CAD Challenges for Microsensores, Microactuators, and Microsystems. **Proceedings of the IEEE**, v. 86, n. 8, 1998.
- SENTURIA, S. D. A Computer-Aided Design System for Microelectromechanical Systems (MEMCAD). **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 1, n. 1, Mar 1992.
- SENTURIA, S. D. Feynman revisited. In: IEEE WORKSHOP ON MEMS'94, 1994, Oiso, Japan. **Proceedings...[S.I]: IEEE, 1994,** p. 309-312.
- SHAW, K. A. SCREAM I: a single mask, single-cristal silicon reactive ion etching process for microelectromechanical structure. **Sensors and Actuators A.** v. 4, p. 63, 1994.
- SWANSON ANALYSIS SYSTEMS INC. **ANSYS User's Manual.** Procedure Manual. Houton : Swanson Analysis Systems Inc., 1998.
- SILVA, W. L. **Métodos de Identificação de Sistemas Auxiliados por Computador.** 1997. Dissertação. Programa de Pos-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1997.
- SUN, Y. A high-aspect-ratio two-axis electrostatic microactuator with extended travel range. **Sensors and Actuators A**, v.102, p. 49-60, 2002.
- SZE, S. M. **Semiconductor Sensors.** New York : John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- TANG, W. C. Electrostatic-comb drive of lateral polysilicon resonators. **Sensors and Actuators**, v. A21-A23, p. 328-331, 1990.
- TANG, W. C.; NGUYEN, T. H.; HOWE, R. T. Laterally driven polysilicon resonant microstructures. In: AN INVESTIGATION OF MICRO STRUCTURES, SENSORS, ACTUATORS, MACHINES AND ROBOTS, 1989, Salt Lake City, U.S.A. **Proceedings... [S.I.]: IEEE, 1989.** p. 55-59.
- TATYANA, S.; YURIY, K.; DMYTRO, K. VHDL-AMS models in MEMS simulations. In: 9^o INTERNATIONAL CONFERENCE - THE EXPERIENCE OF DESIGNING AND APPLICATIONS OF CAD SYSTEMS IN MICROELECTRONICS, 2007, Lviv-Polyana, Ukraine. **Proceedings...[S.I.]: IEEE, 2007.** p. 566 - 566.

- TAVARES, M. R. S.; BARBOSA, J. M. G. **Análise de movimento não rígido em visão por computador**. Universidade do Porto, 2002. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10216/502>>. Acesso em: Fev 2006.
- TILMANS, H. A. C. Equivalent circuit representations of electromechanical transducers: I Lumped-parameter systems. **Micromech. Microeng.** v. 6, p. 157-176, 1996.
- TOMOVICH, C. MOSIS- A gateway to silicon. **IEEE Circuits and Devices Magazine**, v. 4, n. 2, p. 22, Mar 1988.
- VAN BLACK, L. H. **Princípio de Ciência dos Materiais**. 11a., São Paulo : Edgard Bückler Ltda, 1985.
- WANG, K.; NGUYEN, C. T. C. High-order medium frequency micromechanical electronic filters. **Journal of Microelectromechanical Systems**. v. 8, n. 4, p. 534-556, 1999.
- WOLFRAM, H. **Implementations Issues on MEMS - A study on system identification**. TU Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik 2005.
- WONG, J. C. C. Nanotecnología: ¿hacia dónde nos llevará? In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INNOVACIÓN CTS+1, 1., 2006. **Anais...**Ciudad Universitaria, México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2006. p. 10.
- WOOD, D.; BURDESS, J. S.; HARRIS, A. J. Actuators and their mechanisms in microengineering. **Engineering Science and Education Journal**, v. 7, n. 1, p. 19-27, Feb 1998.
- WU, M. C. **Introduction to RF Systems**. University of California, 2003. Disponível em: <<http://www.ee.ucla.edu/~wu/ee250b/RF%20MEMS-1.pdf>>. Acesso em: Out 2008.
- YOLE DEVELOPMENTS. Global MEMS market forecast 2007-2012. **I-Micronews Magazine**, 2007. Disponível em: <www.i-micronews.com/interview.asp?id=27>. Acesso em: Ago 2008.
- ZHANG, Y. **MEMS Design Synthesis Based on Hybrid Evolutionary Computation**. 2006. Dissertação. University of California, Berkeley, 2006.
- ZHOU, G.; DOWD, P. A method to include micromechanical components into the systems level simulation. **Sensors and Actuators A**, v. 97-98, p. 386-397, 2002.
- ZILL, D. G.; CULLEN, M. R. **Equações Diferenciais 3a**. São Paulo : Makron Books, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Topologias e dimensões das elasto-massas

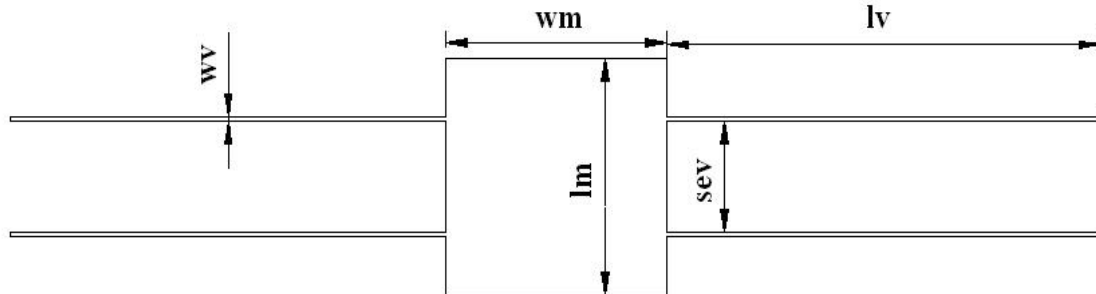
Elasto-Massa Ponte Simples



Dimensões da Ponte Simples.

Propriedades do Ambiente e do Material			
Propriedade	Símbolo	Valor	Unidade
Caminho médio das partículas	λ_m	65×10^{-9}	m
Módulo de Young do Poli sílicio	E	140×10^9	N/m^2
Densidade do Poli sílicio	ρ_{poli}	2.33×10^3	Kg/m^3
Permissividade do vácuo	ϵ_0	8.854×10^{-12}	C/N.m^2
Permissividade relativa do ar	ϵ_{ar}	1.006	Adimensional
Viscosidade absoluta do ar	μ_{ar}	1.8×10^{-5}	N.s/m^2
Viscosidade cinemática do ar	η_{ar}	1.5×10^{-5}	m^2/s
Densidade do ar	ρ_{ar}	1.22	Kg/m^3
Propriedades Geométricas			
Espessura	h	2.1×10^{-6}	m
Largura da viga	w_v	2×10^{-6}	m
Comprimento da viga	l_v	200×10^{-6}	m
Largura da massa	w_m	102×10^{-6}	m
Comprimento da massa	l_m	102×10^{-6}	m
Vão abaixo da viga	d	2×10^{-6}	m
Vão acima da viga	e	2×10^{-6}	m
Força eletrostática			
Força eletrostática	F_e	0.14×10^{-6}	N

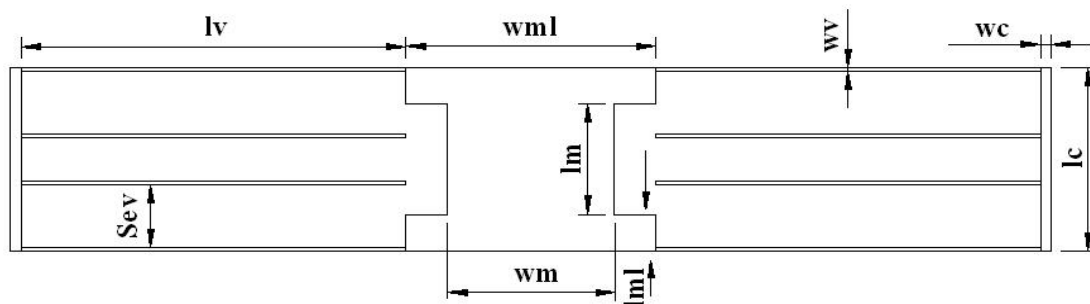
Elasto-Massa Ponte Dupla



Dimensões da Ponte Dupla

Propriedades do Ambiente e do Material			
Propriedade	Símbolo	Valor	Unidade
Caminho médio das partículas	λ_m	65×10^{-9}	m
Modulo de Young do Poli silício	E	140×10^9	N/m^2
Densidade do Poli silício	ρ_{poli}	2.33×10^3	Kg/m^3
Permissividade do vácuo	ϵ_0	8.854×10^{-12}	C/N.m^2
Permissividade relativa do ar	ϵ_{ar}	1.006	Adimensional
Viscosidade absoluta do ar	μ_{ar}	1.8×10^{-5}	N.s/m^2
Viscosidade cinemática do ar	η_{ar}	1.5×10^{-5}	m^2/s
Densidade do ar	ρ_{ar}	1.22	Kg/m^3
Propriedades Geométricas			
Espessura	h	2.1×10^{-6}	m
Largura da viga	w_v	2×10^{-6}	m
Comprimento da viga	l_v	200×10^{-6}	m
Largura da massa	w_m	102×10^{-6}	m
Comprimento da massa	l_m	204×10^{-6}	m
Vão abaixo da viga	d	2×10^{-6}	m
Vão acima da viga	e	2×10^{-6}	m
Separação entre vigas	sev	48×10^{-6}	m
Força eletrostática			
Força eletrostática	F_e	0.14×10^{-6}	N

Elasto-Massa Dobradiça Dupla



Dimensões da Dobradiça Dupla.

Propriedade	Símbolo	Valor	Unidade
Caminho médio das partículas	λ_m	65×10^{-9}	m
Modulo de Young do Poli silício	E	140×10^9	N/m^2
Densidade do Poli silício	ρ_{poli}	$2,33 \times 10^3$	Kg/m^3
Permissividade do vácuo	ϵ_0	$8,854 \times 10^{-12}$	C/N.m^2
Permissividade relativa do ar	ϵ_{ar}	1,006	Adimensional
Viscosidade absoluta do ar	μ_{ar}	$1,8 \times 10^{-5}$	N.s/m^2
Viscosidade cinemática do ar	η_{ar}	$1,5 \times 10^{-5}$	m^2/s
Densidade do ar	ρ_{ar}	1,22	Kg/m^3
Propriedades Geométricas			
Espessura	h	$2,1 \times 10^{-6}$	m
Largura da viga	w_v	2×10^{-6}	m
Comprimento da viga	l_v	200×10^{-6}	m
Largura da massa	w_m	$86,66 \times 10^{-6}$	m
Comprimento da massa	l_m	60×10^{-6}	m
Largura da massa lateral	w_{ml}	130×10^{-6}	m
Comprimento da massa lateral	l_{ml}	20×10^{-6}	m
Largura da coluna	w_c	11×10^{-6}	m
Comprimento da coluna	l_c	100×10^{-6}	m
Vão abaixo da viga	d	2×10^{-6}	m
Vão acima da viga	e	2×10^{-6}	m
Separação entre vigas	sev	34×10^{-6}	m
Força Eletrostática			
Força eletrostática	F_e	$0,14 \times 10^{-6}$	N

APÊNDICE B – Programas para cálculo de M, D e k MATLAB

ELASTO-MASSA PONTE SIMPLES

% PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DA ELASTO-MASSA PONTE SIMPLES

clc

format short e

%

%Propriedades do Ambiente e do Material

Lambda=65e-9;	%Caminho médio das partículas	[m]
Epoli=140e9;	%Módulo de Young do Polissilício	[N/m ²]
Ropoli=2.33e3;	%Densidade do Polissilício	[Kg/m ³]
Ezero=8.854e-12;	%Permissividade do vácuo	[C/Nm ²]
Ear=1.006;	%Permissividade relativa do ar	[adimensional]
uar=1.8e-5;	%Viscosidade absoluta do ar	[Ns/m ²]
Niar=1.5e-5;	%Viscosidade cinemática do ar	[m ² /s]
Roar=1.22;	%Densidade do ar	[Kg/m ³]
relfrq=1;	%Relação w/wn	[adimensional]

%

%Propriedades Geométricas

h=2.1e-6;	%Espessura do núcleo	[m]
wv=2e-6;	%Largura da viga	[m]
lv=200e-6;	%Comprimento da viga	[m]
wm=102e-6;	%Largura da massa	[m]
lm=102e-6;	%Comprimento da massa	[m]
d=2e-6;	%Vão abaixo da viga	[m]
e=2e-6;	%Vão acima da viga	[m]

%

%Força Eletrostática

Fe=0.14e-6;	%Força aplicada ao núcleo	[N]
-------------	---------------------------	-----

%

%Cálculo dos Parâmetros Característicos

MET1=((26*lv*wv*h*Ropoli)/35)+(lm*wm*h*Ropoli)	%Massa Equivalente
CT1=uar*relfrq*(((26*lv*wv)/35)+(lm*wm))*((e+d)/(e*d))	%Amortecimento
KT1=(2*Epoli*h*(wv)^3)/(lv^3)	%Rigidez
frT1=(1/(2*pi))*(sqrt(KT1/MET1))	%Frequência natural
FaT1=CT1/(2*(sqrt(KT1*MET1)))	%Fator amortecimento
fdT1=frT1*(sqrt(1-((FaT1)^2)))	%Frequência amortecida
QT1=1/(2*FaT1)	%Fator de qualidade
XresT1=Fe/(2*KT1*FaT1)	%Máximo deslocamento

%

%Tipo de Amortecimento

if (Fa1>1)

 T='Sistema Sobreamortecido'

 elseif (FaT1==1)

 T='Sistema Criticamente amortecido'

 else

 T='Sistema Subamortecido'

end

ELASTO-MASSA PONTE DUPLA

```

% PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DA ELASTO-MASSA PONTE DUPLA
clc
format short e
%
%Propriedades do Ambiente e do Material
Epoli=140e9;           %Módulo de Young do Polissilício      [N/m2]
Ropoli=2.33e3;        %Densidade do Polissilício      [Kg/m3]
%
%Propriedades Geométricas
h=2.1e-6;             %Espessura do núcleo          [m]
wv=2e-6;              %Largura da viga              [m]
lv=200e-6;           %Comprimento da viga         [m]
wm=204e-6;           %Largura da massa            [m]
lm=102e-6;           %Comprimento da massa        [m]
d=2e-6;              %Vão abaixo da viga          [m]
e=2e-6;              %Vão acima da viga           [m]
%
%Força Eletrostática
Fe=0.14e-6;          %Força aplicada ao núcleo    [N]

%Cálculo dos Parâmetros Característicos
MET2=((52*lv*wv*h*Ropoli)/35)+(lm*wm*h*Ropoli) %Massa Equivalente
CT2=uar*relfrq*(((52*lv*wv)/35)+(lm*wm))*((e+d)/(e*d)) %Amortecimento
KT2=(4*Epoli*h*(wv)^3)/(lv^3) %Rigidez
frT2=(1/(2*pi))*(sqrt(KT2/MET2)) %Frequência natural
FaT2=CT2/(2*(sqrt(KT2*MET2))) %Fator amortecimento
fdT2=frT2*(sqrt(1-((FaT2)^2))) %Frequência amortecida
QT2=1/(2*FaT2) %Fator de qualidade
XresT2=Fe/(2*KT2*FaT2) %Máximo deslocamento
%
%Tipo de Amortecimento
if (FaT2>1)
    T='Sistema Sobreamortecido'
elseif (FaT2==1)
    T='Sistema Criticamente amortecido'
else
    T='Sistema Subamortecido'
end

```

ELASTO-MASSA DOBRADIÇA DUPLA

% PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DA ELASTO-MASSA DOBRADIÇA DUPLA
clc

format short e

%Propriedades do Ambiente e do Material

Epoli=140e9; %Módulo de Young do Polissilício [N/m²]
Ropoli=2.33e3; %Densidade do Polissilício [Kg/m³]

%

%Propriedades Geométricas

h=2.1e-6; %Espessura do núcleo [m]
wv=2e-6; %Largura da viga [m]
lv=200e-6; %Comprimento da viga [m]
wm=86.66e-6; %Largura da massa [m]
lm=60e-6; %Comprimento da massa [m]
wml=130e-6; %Largura da massa lateral [m]
lml=20e-6; %Comprimento da massa lateral [m]
wc=11e-6; %Largura da coluna [m]
lc=100e-6; %Comprimento da coluna [m]
d=2e-6; %Vão abaixo da viga [m]
e=2e-6; %Vão acima da viga [m]

%

%Força Eletrostática

Fe=0.14e-6; %Força aplicada ao núcleo [N]

%Cálculo das superfícies

Sm=(lm*wm)+(2*lml*wml); %Superfície da massa [m²]
Sc=2*lc*wc; % Superfície das colunas [m²]

%

MET3=h*Ropoli*((96*lv*wv/35)+Sm+(Sc/4)) %Massa
CT3=uar*relfrq*(((192*lv*wv)+(144*Sm)+(35*Sc))/144)*((e+d)/(e*d)) %Damping
KT3=(2*Epoli*h*(wv)^3)/(lv^3) %Rigidez
frT3=(1/(2*pi))*(sqrt(KT3/MET3)) %Frequência natural
FaT3=CT3/(2*(sqrt(KT3*MET3))) %Fator de damping
fdT3=frT3*(sqrt(1-((FaT3)^2))) %Freq. amortecida
QT3=1/(2*FaT3) %Fator de qualidade
XresT3=Fe/(2*KT3*FaT3) %Máx deslocamento

%Tipo de Amortecimento

if (FaT3>1)

 T='Sistema Sobreamortecido'

 elseif (FaT3==1)

 T='Sistema Criticamente amortecido'

 else

 T='Sistema Subamortecido'

End

APÊNDICE C – Plataforma de teste: elasto-massas sem/com ruído (ANSYS)

Elasto-Massa - Sem Ruído

```
!      UNIJUI-Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
!      DeTEC - Departamento de Tecnologia
!      Manuel Reibold; Gideon Leandro; Wang Chong; Renato Ribas
!      Análise Transitória da Elasto-Massa
!=====
!      IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO
/FILENAME,TranZacT1,on
/TITLE,Analise Transitoria da Elasto-Massa
/STITLE,1,Manuel Reibold; Gideon Leandro; Wang Chong; Renato Ribas
/PREP7
!=====
!      DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE UNIDADE
/UNIT,si
!=====
!      DEFINIÇÃO DOS DADOS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO
*SET,Eps,2.1      !Eps=Espessura do POLI-SILICIO
*SET,Eos,2      !Eos=Espessura do Oxido de Silicio
*SET,ea,Eps+Eos      !ea=Espessura da âncora
*SET,la,20      !la=Comprimento da âncora
*SET,wa,20      !wa=Largura da âncora
!Dados da viga:
*SET,ev,Eps      !ev=Espessura da viga
*SET,vv,Eos      !vv=Vão da viga
!=====
!      OBTENÇÃO DAS DIMENSÕES GEOMÉTRICAS
MULTIPRO,'start',5
*CSET,1,3,lv,'Comprimento da viga [um]',200.0
*CSET,4,6,wv,'Largura da viga [um]',2.0
*CSET,7,9,lm,'Comprimento da massa [um]',102.0
*CSET,10,12,wm,'Largura da massa [um]',102.0
*CSET,13,15,fv,'Valor da força [uN]',0.14
*CSET,61,62,'ANALISE TRANSITORIA DA ELASTO','-MASSA'
*CSET,63,64,'Manuel Reibold; Gideon Lean','dro; Wang Chong; Renato Ribas'
MULTIPRO,'end'
*IF,_button,eq,0,THEN
!=====
!      CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA
!Construção da massa
RECTNG,-lm/2,lm/2,-wm/2,wm/2
!Construção da viga negativa
RECTNG,-wm/2,-wm/2-lv,-wv/2,wv/2
!Construção da massa
RECTNG,wm/2,wm/2+lv,-wv/2,wv/2
!Construção de uma única área
ASEL,all
```

```

AADD,all
!Geração do volume
VEXT,all,,0,0,ev,,,
SAVE,TranZacT1,db,,all
!=====
!           DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS
MP,ex,1,1.40e5           !uN/um**2           !Módulo de Young
MP,nuxy,1,0.25           !adimensional       !Relação de Poisson
MP,dens,1,2.33e-15       !kg/um**3           !Densidade
!=====
!           DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO PARA EXECUÇÃO DO MESH
ET,1,45,,,,,,,,1
!=====
!                               CRIANDO O MESHING
ESIZE,2,0,
VSWEEP,all
SAVE,TranZacT1,db,,all
FINISH
!=====
!           APLICAÇÃO DE CARGAS E OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO
/SOLU
ANTYPE,trans,,,
TRNOPT,full,
DA,3,ux,,1              !Atribuição de não-deslocamento as âncoras
DA,3,uy,,1
DA,3,uz,,1
DA,10,ux,,1
DA,10,uy,,1
DA,10,uz,,1
ALPHAD,1870
BETAD,1.6646e-7
AUTOTS,on
DELTIM,0.00001
OUTPR,,
OUTRES,,1
F,5352,fy,fv
KBC,1
TIME,3e-3
LSWRITE,1              !Primeira força colocada sem considerar as condições
iniciais.
SAVE,TranZacT1,db,,all
LSSOLVE,1,1,1
FINISH
!=====
!                               RESULTADOS - Gráfico
/POST26
NSOL,2,5352,U,y,Deslocamento
ESOL,3,2949,5352,f,y,Forca
ESOL,4,3051,5352,f,y,Forca
ADD,5,4,3,,Forca,,-1,-1,-1

```



```

/GRID,1
/XRANGE,0,3e-3
PLVAR,2,5
!=====
!
!                                RESULTADOS - Arquivo
*GET,size,VARI,,NSETS
*dim,TIME_1,array,size           !Cria o arranjo para o tempo
*dim,Fy_1,array,size             !Cria o arranjo para a força aplicada
*dim,Uy_1,array,size             !Cria o arranjo para o deslocamento
VGET,TIME_1(1),1
VGET,Fy_1(1),5
VGET,Uy_1(1),2
*CFOPEN,c:\Tese1\Estruturas\EstruturaT1\3_IdenZacT1\1_ArxZacT1\DeslZacT11.txt
!                                !Abre o arquivo onde serão guardados os dados
*VWRITE,TIME_1(1),Fy_1(1),Uy_1(1)!Escreve as variáveis no arquivo DeslZacT1.txt
(2x,f10.6,2x,f12.6,2x,f12.6)      !Formata os dados
*CFCLOSE                          !Fecha o arquivo
FINISH
!=====
*ELSE
*MSG,UI, !Cancelou a execução a partir dos dados geométricos. Reinicie o programa.
FINISH
/CLEAR
*ENDIF

```

Elasto-Massa - Com Ruído

```
!           UNIUI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
!
!           DeTEC - Departamento de Tecnologia
!           Manuel Reibold; Gideon Leandro; Wang Chong; Renato Ribas
!           Análise Transitória da Elasto-Massa com injeção de Ruído
!=====
!
!           IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO
/FILENAME,TranRuiT1,on
/TITLE,Analise Transitoria da Elasto-Massa com injeção de Ruído
/STITLE,1,Manuel Reibold; Gideon Leandro; Wang Chong; Renato Ribas
/PREP7
!=====
!
!           DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE UNIDADE
/UNIT,si
!=====
!
!           DEFINIÇÃO DOS DADOS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO
*SET,Eps,2.1           !Eps=Espessura do POLI-SILICIO
*SET,Eos,2           !Eos=Espessura do Oxido de Silicio
*SET,ea,Eps+Eos      !ea=Espessura da âncora
*SET,la,20           !la=Comprimento da âncora
*SET,wa,20           !wa=Largura da âncora
!Dados da viga:
*SET,ev,Eps           !ev=Espessura da viga
*SET,vv,Eos           !vv=Vão da viga
!=====
!
!           OBTENÇÃO DAS DIMENSÕES GEOMÉTRICAS
MULTIPRO,'start',5
*CSET,1,3,lv,'Comprimento da viga [um]',200.0
*CSET,4,6,wv,'Largura da viga [um]',2.0
*CSET,7,9,lm,'Comprimento da massa [um]',102.0
*CSET,10,12,wm,'Largura da massa [um]',102.0
*CSET,13,15,fv,'Valor da força [uN]',0.14
*CSET,61,62,'ANALISE TRANSITORIA DA ELASTO-','MASSA'
*CSET,63,64,'Manuel Reibold; Gideon Lean','dro; Wang Chong; Renato Ribas'
MULTIPRO,'end'
*IF,_button,eq,0,THEN
!=====
!
!           CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA
!Construção da massa
RECTNG,-lm/2,lm/2,-wm/2,wm/2
!Construção da viga negativa
RECTNG,-wm/2,-wm/2-lv,-wv/2,wv/2
!Construção da massa
RECTNG,wm/2,wm/2+lv,-wv/2,wv/2
!Construção de uma única área
ASEL,all
AADD,all
!Geração do volume
VEXT,all,,0,0,ev,,,
```

```

SAVE,TranRuiT1,db,,all
!=====
!           DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS
MP,ex,1,1.40e5           !uN/um**2           !Módulo de Young
MP,nuxy,1,0.25          !adimensional          !Relação de Poisson
MP,dens,1,2.33e-15      !kg/um**3             !Densidade
!=====
!           DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO PARA EXECUÇÃO DO MESH
ET,1,45,,,,,,,,,1
!=====
!
!                               CRIANDO O MESHING
ESIZE,2,0,
VSWEET,all
SAVE,TranRuiT1,db,,all
FINISH
!=====
!           APLICAÇÃO DE CARGAS E OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO
/SOLU
ANTYPE,trans,,,,
TRNOPT,full,
DA,3,ux,,1              !Atribuição de não-deslocamento as âncoras
DA,3,uy,,1
DA,3,uz,,1
DA,10,ux,,1
DA,10,uy,,1
DA,10,uz,,1
ALPHAD,1870
BETAD,1.6646e-7
AUTOTS,on
KBC,1
TIME,3e-3
DELTIM,0.00001
OUTPR,all,all
OUTRES,all,1
/PBC,ALL, ,1            !Aplicação da força
/PNUM,TABN,1            !mostra o nome da tabela no local onde aplicou a força.
*dim,forcaY,table,601,1,1,time !define a tabela com o nome força Y que tem 51 dados
!                          !(pode ser qts quiser) variando com time
*vfill,forcaY(1),rand,fv*0.9,fv*1.1!os 51 dados são produzidos pela função rand
!                          !dentro a facha 10% menos ou mais que 0.14
*vfill,forcaY(1,0),ramp,0.0,5e-6!Para os 51 dados, o time começa a 0.0 e incrementa
!                          !0.00002=0.001/50=(TIME final)/(51- 1)
F,5352,fy,%forcaY%
SAVE,TranRuiT1,db,,all
SOLVE
FINISH
!=====
!
!                               RESULTADOS - Gráfico
/POST26
NSOL,2,5352,U,y,Deslocamento

```

```

ESOL,3,2949,5352,f,y,Forca
ESOL,4,3051,5352,f,y,Forca
ADD,5,4,3,,fyy,,,-1,-1,1,
/GRID,1
/XRANGE,0,3e-3
PLVAR,2,5
!=====
!  

!                                RESULTADOS - Arquivo
*GET,size,VARI,,NSETS
*dim,TIME_1,array,size           !Cria o arranjo para o tempo
*dim,Fy_1,array,size            !Cria o arranjo para a força aplicada
*dim,Uy_1,array,size           !Cria o arranjo para o deslocamento
VGET,TIME_1(1),1
VGET,Fy_1(1),5
VGET,Uy_1(1),2
*CFOPEN,c:\Tese2\Estruturas\EstruturaRT1\2_IdeRT1\1_ArxRT1\DeslRT1.txt
!  

!                                !Abre o arquivo onde serão guardados os dados
*VWRITE,TIME_1(1),Fy_1(1),Uy_1(1)!Escreve as variáveis no arquivo DeslZacT1.txt
(2x,f10.6,2x,f12.6,2x,f12.6)     !Formata os dados
*CFCLOSE                         !Fecha o arquivo
FINISH
!=====
*ELSE
*MSG,UI, Cancelou a execução a partir dos dados geométricos. Reinicie o programa.
FINISH
/CLEAR
*ENDIF

```

APÊNDICE D – Plataforma de teste: atuador sem/com ruído (ANSYS)

Comb Drive e Elasto-Massas - Sem Ruído

```
!      UNIUI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
!      DEtec - Departamento de Tecnologia
!      Manuel Reibold; Gideon Leandro; Wang Chong; Renato Ribas
!      Análise Eletromecânica do Comb-drive e Elasto-Massas
!      Utilizando Parâmetros Concentrados
!=====
!      IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO
/FILENAME,TransCombPCT1,on
/TITLE,Analise Eletromecanica - Comb-drive e Elasto-Massa com injeção de ruído
/STITLE,1,Manuel Reibold; Gideon Leandro; Wang Chong; Renato Ribas
/PREP7
!=====
!      DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE UNIDADE
/UNIT,si      !Sistema MKS de unidades
!=====
!      Propriedades do ambiente e do material para calcular os parâmetros
Epoli=1.40e5      !Módulo de Young do Polissilício      [uN/um**2]
Ropoli=2.33e-15      !Densidade do Polissilício      [Kg/um**3]
Ezero=8.854e-6      !Permissividade do vácuo      [pF/um**2]
!=====
!      OBTENÇÃO DAS DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DA ELASTO-MASSA
MULTIPRO,'start',5
*CSET,1,3,h,'Espessura do núcleo [um]',2.1
*CSET,4,6,lv,'Comprimento da viga [um]',200.0
*CSET,7,9,wv,'Largura da viga [um]',2.0
*CSET,10,12,lm,'Comprimento da massa [um]',102.0
*CSET,13,15,wm,'Largura da massa [um]',102.0
*CSET,61,62,'Analise Transitoria do Comb-dri','e da elasto-massa'
*CSET,63,64,'Manuel Reibold; Gideon Lean','dro; Wang Chong; Renato Ribas'
MULTIPRO,'end'
*IF,_button,eq,0,THEN
!      OBTENÇÃO DAS DIMENSÕES GEOMETRICAS DO COMB-DRIVE
MULTIPRO,'start',7
*CSET,1,3,Ld,'Comprimento do dente [um]',100.0
*CSET,4,6,wd,'Largura do dente [um]',10.0
*CSET,7,9,gdi,'Gap Inicial [um]',5.0
*CSET,10,12,gdmin,'Gap Mínimo [um]',1
*CSET,13,15,Olap,'Fator de overlap',0.5
*CSET,16,18,n,'Número de Dedos',14
*CSET,19,21,Vr,'Tensao do rotor [v]',25.0
*CSET,61,62,'Analise Transitoria do Comb-driv','e a elasto-massa'
*CSET,63,64,'Manuel Reibold; Gideon Lean','dro; Wang Chong; Renato Ribas'
MULTIPRO,'end'
*IF,_button,eq,0,THEN
!=====
```

```

!                CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA ELASTO-MASSA
*SET,d,2.0                !d Vão abaixo da viga [um]
*SET,e,2.0                !e Vão acima da viga [um]
MT1=((26*lv*vv*h*Ropoli)/35)+(lm*wm*h*Ropoli)        !Massa
CT1=uar*relfrq*(((26*lv*vv)/35)+(lm*wm))*((e+d)/(e*d))  !Amortecimento
KT1=(2*Epoli*h*(vv*vv*vv))/(lv*lv*lv)                !Elasticidade
!                CÁLCULO DOS CAPACITORES DO COMB-DRIVE
C0=Ezero*h*Ld
C1=n*2*Ezero*h*Ld
C2=n*2*Ezero*h
!=====

!                DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS CONCENTRADOS
!Definição do elemento transdutor considerando um comb-drive de 10 dedos
ET,1,trans126,,,,,1        !Elemento Transdutor
R,1,,,gdi,gdmin            !Define o gap inicial e o gap mínimo
RMORE,C0,C1,C2              !Definição da curva capacitiva
N,1                          !Define o nó e lhe atribui o número 1
N,2,0.1                     !Define outro nó e lhe atribui o número 2
E,1,2                       !Define os nós do elemento trans126
ET,2,21,,,,,4              !Elemento massa numero 21 (UX,UY dof option)
R,2,MT1                      !Define-se a massa do núcleo
RMODIF,2,7,,1              !Modifica o conjunto de constantes reais
TYPE,2                       !Indica qual elemento
REAL,2                       !Ajusta o elemento como ponteiro
E,2                          !Define o nó para o elemento massa
ET,3,14,,1                 !Elemento mola e capacitor
KEYOPT,3,7,1                !Utilizado para suprimir mensagens de nós
R,3,KT1,CT1                !Define a constante de elasticidade K e C
N,3,0.2                     !Define o nó para ligar a mola e o capacitor
TYPE,3                       !Indica qual elemento
REAL,3                       !Ajusta o elemento como ponteiro
E,2,3                       !Define a mola entre o nó 2 e o nó 3
!=====

!                DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO
NSEL,s,node,,1,3,2          !Seleciona os nos (a ordem tem que prevalecer)
D,all,ux,0                  !Imobiliza esses nós na direção x
NSEL,all                    !Seleciona todos os nodos
D,1,volt,0                  !Coloca o potencial Terra no nó 1
D,2,uy,0                    !Imobiliza o a massa na direção y
FINISH

!                SOLUÇÃO TRANSITÓRIA DO PROBLEMA
/CONFIG,nres,3500
/SOLU
ANTYPE,trans                !Análise Transitória
KBC,1                       !Condições de fronteira por passo
D,2,volt,Vr                 !Aplicação de potencial elétrico ao rotor
TIME,0.003                  !Tempo Final do passo de carga aplicada
DELTIM,0.000002            !Tempo inicial do incremento
AUTOS,on                    !Uso do tempo de passo automático
OUTRES,all,all              !Grava todos os resultados intermediários

```

```

CNVTOL,f,1,0.00001          !Convergência da força
SOLVE                       !Resolve
FINISH
!=====
!                               RESULTADO - Gráfico
/POST26
NSOL,2,2,u,x,Ux             !Examina o deslocamento no n?2
NSOL,3,2,volt,x,Vr          !Examina o potencial elétrico no rotor
NUMVAR,200                  !Especifica o número de variáveis no Post26
FILLDATA,191,,,,,1,1       !Preenche uma variável como função rampa
REALVAR,191,191            !Forma a variável usando unicamente a parte real
RFORCE,4,0,F,X, FX_4       !Força de reação total a ser armazenada do nó "0"
RFORCE,4,3,F,X,fx          !Força de reação total a ser armazenada do nó "3"
NUMVAR,200                  !Especifica o número de variáveis no Post26
FORCE,TOTAL                 !Seleciona o tipo de força do elemento para saída
SHELL,TOP                   !Seleciona face elemento saída dos resultados
LAYERP26,0                  !Especifica a face para dados a armazenar
ESOL,5,3, ,SMIS,1,fx       !Especifica os dados a serem armazenados
VARDEL,5                    !Apaga a variável 5
FORCE,TOTAL                 !Seleciona o tipo de força do elemento para saída
SHELL,TOP                   !Seleciona face elemento saída dos resultados
LAYERP26,0                  !Especifica face para dados a armazenar
ESOL,5,3, ,SMIS,1,fx       !Especifica dados a serem armazenados
!Condições do gráfico
/XRANGE,0,0.003
/YRANGE,0.0,0.60
/AXLAB,x,Tempo (s)
/AXLAB,y,Deslocamento (umetros)
PLVAR,2,3,!4                !Gráfico do deslocamento e da voltagem
!FINISH                      !Bloquear quando salvar dados no arquivo
!=====
!                               RESULTADO - Arquivo
*GET,size,VARI,,NSETS
*DIM,TIME_1,array,size      !Cria o arranjo para o tempo
*DIM,Vx_1,array,size        !Cria o arranjo para o potencial elétrico
*DIM,Ux_1,array,size        !Cria o arranjo para o deslocamento
VGET,TIME_1(1),1
VGET,Vx_1(1),3
VGET,Ux_1(1),2
*CFOPEN,c:\Tese3\1_CombPC\CombPCT1\2_IdenCombPCT1\1_ArxCombPCT1\
\DeslVT11.txt               !Abre o arquivo onde serão guardados os dados
*VWRITE,TIME_1(1),Vx_1(1),Ux_1(1)!Escreve as variáveis no arquivo DeslVT11.txt
(2x,f10.6,2x,f12.6,2x,f12.6) !Formata os dados
*CFCLOSE                     !Fecha o arquivo
FINISH
!=====
*ELSE
*MSG,UI, Cancelou a execução a partir do comb-drive. Reinicie o programa.
FINISH
/CLEAR

```

*ENDIF

!=====

*ELSE

*MSG,UI,Cancelou a execução a partir do núcleo. Reinicie o programa.

FINISH

/CLEAR

*ENDIF

Comb-drive e Elasto-Massa – Com ruído

```
!   UNIUI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
!           DETEC - Departamento de Tecnologia
!           Manuel Reibold; Gideon Leandro; Wang Chong; Renato Ribas
!           Análise Eletromecânica do Comb-drive e Elasto-Massa
!=====
!           IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO
/FILENAME,RCombPCT1,on
/TITLE,Analise Eletromecanica Comb-drive e Elasto-Massa com injeção de ruído
/STITLE,1,Manuel Reibold; Gideon Leandro; Wang Chong; Renato Ribas
/PREP7
!=====
!           DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE UNIDADE
/UNIT,si           !Sistema MKS de unidades
!=====
!           Propriedades do ambiente e material para calculo de parâmetros
Epoli=1.40e5           !Módulo de Young do Polissilício[uN/um**2]
Ropoli=2.33e-15       !Densidade do Polissilício[Kg/um**3]
Ezero=8.854e-6       !Permissividade do vácuo [pF/um**2]
!=====
!           OBTENÇÃO DAS DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DA ELASTO-MASSA
MULTIPRO,'start',5
*CSET,1,3,h,'Espessura do núcleo [um]',2.1
*CSET,4,6,lv,'Comprimento da viga [um]',200.0
*CSET,7,9,wv,'Largura da viga [um]',2.0
*CSET,10,12,lm,'Comprimento da massa [um]',102.0
*CSET,13,15,wm,'Largura da massa [um]',102.0
*CSET,61,62,'Analise Transitoria do Comb-drive ', 'e da elasto-massa'
*CSET,63,64,'Manuel Reibold; Gideon Lean','dro; Wang Chong; Renato Ribas'
MULTIPRO,'end'
*IF,_button,eq,0,THEN
!           OBTENÇÃO DAS DIMENSÕES GEOMETRICAS DO COMB-DRIVE
MULTIPRO,'start',7
*CSET,1,3,Ld,'Comprimento do dente [um]',100.0
*CSET,4,6,wd,'Largura do dente [um]',10.0
*CSET,7,9,gdi,'Gap Inicial [um]',5.0
*CSET,10,12,gdmin,'Gap Mínimo [um]',1.0
*CSET,13,15,Olap,'Fator de overlap',0.5
*CSET,16,18,n,'Número de Dedos',14
*CSET,19,21,Vr,'Tensao do rotor [v]',25.0
*CSET,61,62,'Analise Transitoria do Comb-drive', 'e da elasto-massa'
*CSET,63,64,'Manuel Reibold; Gideon Lean','dro; Wang Chong; Renato Ribas'
MULTIPRO,'end'
*IF,_button,eq,0,THEN
!=====
!           CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA ELASTO-MASSA
*SET,d,2.0           !d é o Vão abaixo da viga [um]
*SET,e,2.0           !e é o Vão acima da viga [um]
MT1=((26*lv*wv*h*Ropoli)/35)+(lm*wm*h*Ropoli)           !Massa
CT1=uar*relfrq*(((26*lv*wv)/35)+(lm*wm))*((e+d)/(e*d)) !Amortecimento
```

```

KT1=(2*Epoli*h*(wv*wv*wv))/(lv*lv*lv)           !Elasticidade
!           CÁLCULO DOS CAPACITORES DO COMB-DRIVE
C0=Ezero*h*Ld
C1=n*2*Ezero*h*Ld
C2=n*2*Ezero*h
!=====
!           DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS CONCENTRADOS
!Definição do elemento transdutor considerando um comb-drive de 10 dedos
ET,1,trans126,,,,,1           !Elemento Transdutor
R,1,,,gdi,gdmin           !Define o gap inicial e o gap mínimo
RMORE,C0,C1,C2           !Definição da curva capacitiva
N,1           !Define o nó e lhe atribui o número 1
N,2,0.1           !Define outro nó e lhe atribui o número 2
E,1,2           !Define os nós do elemento trans126
ET,2,21,,,4           !Elemento massa numero 21 (UX,UY dof option)
R,2,MT1           !Define-se a massa do núcleo
RMODIF,2,7,,1           !Modifica o conjunto de constantes reais
TYPE,2           !Indica qual elemento
REAL,2           !Ajusta o elemento como ponteiro
E,2           !Define o nó para o elemento massa
ET,3,14,,1           !Elemento mola
KEYOPT,3,7,1           !Utilizado para suprimir mensagens de nós
R,3,KT1,CT1           !Define a constante de elasticidade K em  $\mu\text{N}/\mu\text{m}$ 
N,3,0.2           !Define o nó para ligar a mola
TYPE,3           !Indica qual elemento
REAL,3           !Ajusta o elemento como ponteiro
E,2,3           !Define a mola entre o nó 2 e o nó 3
!=====
!           DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO
NSEL,s,node,,1,3,2           !Seleciona os nó (a ordem tem que prevalecer)
D,all,ux,0           !Imobiliza esses nós na direção x
NSEL,all           !Seleciona todos os nodos
D,1,volt,0           !Coloca o potencial Terra nó nodo 1
D,2,uy,0           !Imobiliza o a massa na direção y
FINISH
!           SOLUÇÃO TRANSITÓRIA DO PROBLEMA
/CONFIG,nres,3500
/SOLU
ANTYPE,trans           !Análise Transitória
TRNOPT,full
KBC,1           !Condições de fronteira por passo
TIME,0.003           !Tempo Final do passo de carga aplicada
DELTIM,0.000005           !Tempo inicial do incremento
AUTOTS,on           !Uso do tempo de passo automático
OUTRES,all,all           !Grava todos os resultados intermediários
CNVTOL,f,1,0.00001           !Convergência da força
/PBC,all,,1
/PNUM,tabn,1
*DIM,voltage,table,601,1,1,time
*VFILL,voltage(1),rand,Vr*0.95,Vr*1.05

```

```

*VFILL,voltage(1,0),ramp,0.0,0.0005
D,2,volt,%voltage%
SOLVE                                     !Resolve
!=====
!                                     RESULTADO - Gráfico
/POST26
NSOL,2,2,u,x                             !Examina o deslocamento no nó 2
NSOL,3,2,volt,x,vr                       !Examina o potencial elétrico no rotor
!Condições do gráfico
/XRANGE,0,0.003
/YRANGE,-0.20,0.80
/AXLAB,x,Tempo (s)
/AXLAB,y,Deslocamento (umetros)
PLVAR,2!,3!Plota o deslocamento e a voltagem
!=====
!                                     RESULTADO - Arquivo
*GET,size,VARI,,NSETS
*dim,TIME_1,array,size                   !Cria o arranjo para o tempo
*dim,Vx_1,array,size                     !Cria o arranjo para a força aplicada
*dim,Ux_1,array,size                     !Cria o arranjo para o deslocamento
VGET,TIME_1(1),1
VGET,Vx_1(1),3
VGET,Ux_1(1),2
*CFOPEN,c:\Tese4\1_RCombPC\RCombPCT1\2_IdRCombPCT1\1_RArCombPCT1\
DesRVT11.txt                             !Abre o arquivo onde serão guardados os dados
*VWRITE,TIME_1(1),Vx_1(1),Ux_1(1)!Escreve as variáveis no arquivo DeslVT11.txt
(2x,f10.6,2x,f12.6,2x,f12.6)             !Formata os dados
*CFCLOSE                                  !Fecha o arquivo
FINISH
!=====
*ELSE
*MSG,UI, Cancelou o programa a partir dos dados do comb-drive. Reinicie.
FINISH
/CLEAR
*ENDIF
!=====
*ELSE
*MSG,UI,
Cancelou a execução do programa a partir dos dados do núcleo. Reinicie o programa.
FINISH
/CLEAR
*ENDIF

```

APÊNDICE E – Programa MATLAB: Estimadores RLS e RIV

```

% IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS M, D, K
% Modelo ARX para Atuador e/ou Elasto-Massa
% Estimador Recursivo dos Mínimos Quadrados
%
%Limpeza da tela e da área de trabalho
clc;
clear;
close all;
%=====
%Dados do Comb-drive
N=14; %Número de dentes
Ezero=8.854e-12; %Permissividade do vácuo
h=2.1e-6; %Espessura dos dentes
g=1e-6; %Gap entre os dentes
A=N*Ezero*h/g; %Constante da força eletrostática
%=====
%Lendo o arquivo de dados
s=load('DesRVT12.txt');
V=s(:,2);
VT1i=abs(mean(V));
VU=V./V;
X=s(:,3)*1e-6;
Ta=0.000005; %Tempo de amostragem no ANSYS
nA=length(V); %Quantidade de dados amostrados
%=====
%Inicialização do algoritmo
Teta=[0;0;0];
P=[10e20,0,0;0,10e20,0;0,0,10e20];
for(i=3:nA)
    fi=[-X(i-1);-X(i-2);VU(i-1)];
    L=(P*fi)/(fi'*P*fi+1);
    Teta=Teta+L*(X(i)-fi'*Teta);
    P=P-L*fi'*P;
end
%Verificação do Valor de TETA
Teta;
%Obtenção da Função Discreta em z do Núcleo
num=[0 0 Teta(3)];
den=[1 Teta(1) Teta(2)];
sysd=tf(num,den,Ta);
sysc=d2c(sysd,'zoh');
[numm,denm]=tfdata(sysc,'v');
Fe=(A*((VT1i)^2))
%Parâmetros Identificados
MET1i=A*((VT1i)^2)/numm(3)
CT1i=MET1i*denm(2)
KT1i=MET1i*denm(3)
numi=[0 0 (A*(VT1i)^2)];

```

```

deni=[MET1i CT1i KT1i];
sir=tf(numi,deni);
%=====
%Gráficos:
t=Ta:Ta:0.003;
%Gráfico gerado a partir dos parâmetros analíticos
%xanal=step(s1,t);
%plot(t,xanal,'r')
hold on
%Gráfico gerado a partir dos dados do ANSYS
%plot(t,X,'k.')
%Gráfico gerado a partir dos parâmetros identificados
xiden=step(sir,t);
%plot(t,xiden,'c-')
%Características do gráfico
%grid
%title('Núcleo Deformável N1 - Ta=0.00001 s')
%ylabel('Displacement [m]')
%xlabel('Time [s]')
%legend('Modelo Analítico','Modelo ANSYS','Modelo ARX',1)
%legend('ANSYS Model','ARX Model',1)
%Gráfico gerado a partir do número de amostras e o erro das saídas
k=1:1:nA;
difx=(abs((xiden-X)/xiden))*100;
plot(k,difx,'k-')
grid
%title('Modelo ANSYS vrs. Modelo ARX - Núcleo N1')
ylabel('ERRO [%]')
xlabel('Amostras')
%Cálculo do Erro Médio Quadrático
Soma=0;
for k=1:1:nA
Soma=Soma+((xiden(k)-X(k))^2.);
end
EMQ=((sqrt(Soma))/nA)*100

```

```

%                               IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS M, D, k
%                               Modelo ARX Comb-drive e Elasto-Massa
%                               Estimador Recursivo Variável Instrumental
%Limpeza da tela e da área de trabalho
clc;
clear;
close all;
%format short e
%=====
%Dados do Comb-drive
N=14;%Número de dentes
Ezero=8.854e-12;           %Permissividade do vácuo
h=2.1e-6;                 %Espessura dos dentes
g=1e-6;                   %Gap entre os dentes
A=N*Ezero*h/g;           %Constante da força eletrostática
%=====
%Lendo o arquivo de dados
s=load('DesRVT12.txt');
V=s(:,2);
VT1i=abs(mean(V));
VU=V./V;
X=s(:,3)*1e-6;
Ta=0.000005;              %Tempo de amostragem no ANSYS
nA=length(V);             %Quantidade de dados amostrados
%=====
%Inicialização do algoritmo
Lamba=1;
Teta=[0;0;0];
P=[10e20,0,0;0,10e20,0;0,0,10e9];
Tetaiv=Teta;
Piv=P;
for(i=3:nA)
    fi=[-X(i-1);-X(i-2);VU(i-1)];
    L=P*fi/(Lamba+fi'*P*fi);
    P=(P-L*fi'*P)/Lamba;
    Teta=Teta+L*(X(i)-fi'*Teta);
    Xrls(i)=fi'*Teta;
    %
    QS=[-Xrls(i-1);-Xrls(i-2);VU(i-1)];
    Liv=Piv*QS/(Lamba+fi'*Piv*QS);
    Piv=(Piv-Liv*fi'*Piv)/Lamba;
    Tetaiv=Tetaiv+Liv*(X(i)-fi'*Tetaiv);
end
%Verificação do Valor de TETA
Tetaiv;
%Obtenção da Função Discreta em z do Núcleo
num=[0 0 Tetaiv(3)];
den=[1 Tetaiv(1) Tetaiv(2)];
sysd=tf(num,den,Ta);
sysc=d2c(sysd,'zoh');

```

```

[numm,denm]=tfdata(sysc,'v');
%
Fe=(A*((VT1i)^2))
%
%Parâmetros Identificados
MET1i=A*((VT1i)^2)/numm(3)
CT1i=MET1i*denm(2)
KT1i=MET1i*denm(3)
%
numi=[0 0 (A*(VT1i)^2)];
deni=[MET1i CT1i KT1i];
sir=tf(numi,deni);
%=====
%Gráficos:
t=Ta:Ta:0.003;
%Gráfico gerado a partir dos parâmetros analíticos
%xanal=step(s1,t);
%plot(t,xanal,'r')
hold on
%Gráfico gerado a partir dos dados do ANSYS
%plot(t,X,'k.')
%Gráfico gerado a partir dos parâmetros identificados
xiden=step(sir,t);
%plot(t,xiden,'c-')
%Características do gráfico
%grid
%title('Núcleo Deformável N1 - Ta=0.00001 s')
%ylabel('Displacement [m]')
%xlabel('Time [s]')
%legend('Modelo ANSYS','Modelo ARX',1)
%legend('ANSYS Model','ARX Model',1)
%Gráfico gerado a partir do número de amostras e o erro das saídas
k=1:1:nA;
difx=(abs((xiden-X)/xiden))*100;
plot(k,difx,'k-')
grid
%title('Modelo ANSYS vrs. Modelo ARX – Elasto-Massa)
ylabel('ERRO [%]')
xlabel('Amostras')
%Cálculo do Erro Médio
Soma=0;
for k=1:1:nA
Soma=Soma+((xiden(k)-X(k))^2.);
end
EMQ=((sqrt(Soma))/nA)*100

```