ANDRES CHOI

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BOMBA DE FLUXO PIEZELÉTRICA DE
DIAFRAGMA**

SÃO PAULO

Outubro de 2009

ANDRES CHOI

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BOMBA DE FLUXO PIEZELÉTRICA DE
DIAFRAGMA**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia
Mecânica.

SÃO PAULO
Outubro de 2009

ANDRES CHOI

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BOMBA DE FLUXO PIEZELÉTRICA DE
DIAFRAGMA**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Área de Concentração:
Engenharia de Controle e Automação
Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva

SÃO PAULO
Outubro de 2009

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 27 de outubro de 2009.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Choi, Andres

**Desenvolvimento de uma bomba de fluxo piezelétrica de diafragma / A. Choi. -- ed.rev. -- São Paulo, 2009.
70 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

**1. Dinâmica dos fluídos 2. Método dos elementos finitos
3. Atuadores pielétricos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.**

Em memória à minha avó materna,
Bok Ye Jo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva, pelas importantes orientações recebidas durante a condução deste trabalho, por ter me orientado pelos caminhos da pesquisa, e por inspirar grande confiança e motivação em seus alunos.

Minha imensa gratidão à minha mãe Angela Kim e ao meu pai Daniel Choi por terem me preparado para a vida, pelo amor, carinho e apoio incondicional.

Aos meus irmãos, Anderson e Alfred, meus eternos companheiros e amigos.

Ao grande amor da minha vida, Mona Kim, por todo afeto, apoio, paciência e compreensão durante a trajetória deste trabalho.

Aos meus tios e primos pelo incentivo recebido durante minha vida acadêmica.

Ao grande amigo Sandro Luis Vatanabe, pelo enorme auxílio prestado na realização deste trabalho, além da amizade e apoio em todas as horas.

Aos amigos da pós-graduação Erick Wakamoto Takarabe, Ronny Calixto Carbonari, Marco Aurélio Brizzotti Andrade, Cesar Yukishigue Kiyono, Fausto Kenzo Chinen, Rodrigo Bellizia Polastro, Adriano Akio Koga e Luiz Augusto Motta Mello pela amizade e companheirismo.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa de mestrado.

RESUMO

Bombas de fluxo são dispositivos importantes em áreas como a Bioengenharia, Medicina, Farmácia, entre outras aplicações clássicas de Engenharia. Princípios para o bombeamento de fluidos baseados em atuadores piezelétricos estão sendo estudados no Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica, que permitem a construção de bombas de fluxo de pequena escala, ou seja, bombas de fluxo de pequena potência para deslocamento de pequenos volumes de fluido com baixo consumo de energia. O presente trabalho estuda bombas de fluxo piezelétricas de diafragma do tipo “valve-less” para geração de vazão. A bomba de fluxo piezelétrica de diafragma utiliza cerâmica piezelétrica como atuador para mover uma membrana (diafragma) para cima e para baixo como um pistão, que causa uma seqüência de aumento e diminuição do volume da câmara da bomba, forçando a entrada e a saída do fluido na bomba. A direção do fluxo é garantida por válvulas que privilegiam o fluxo em apenas um sentido. O objetivo deste trabalho é o estudo da metodologia de desenvolvimento de uma bomba de fluxo piezelétrica de diafragma de baixo custo do tipo “valve-less”. Para tanto, será utilizado a modelagem por Método dos Elementos Finitos (MEF) para a realização de análises de sensibilidade dos parâmetros geométricos e construtivos da bomba de fluxo. Serão realizadas simulações de escoamento de fluido pelo Método de Volumes Finitos (MVF) para a realização de análises de sensibilidade dos parâmetros geométricos dos elementos difusor/bocal e o levantamento das curvas características da bomba de fluxo. Por fim, protótipos serão construídos e caracterizados para validação dos resultados computacionais. Serão apresentadas a metodologia empregada e a discussão dos resultados obtidos, de forma a analisar o princípio proposto e os fenômenos físicos em questão.

ABSTRACT

Flow pumps act as important devices in areas as Bioengineering, Medicine, Pharmacy, among other areas of Engineering. Principles for pumping fluids based on piezoelectric actuators have been studied in the Department of Mechatronic and Mechanical Engineering of “Escola Politécnica da Universidade de São Paulo”, that allow the construction of small flow pumps, in other words, pumps for displacement of small fluid volumes with low power consumption. The present work studies valve-less piezoelectric diaphragm flow pumps for flow generation. The piezoelectric diaphragm flow pump uses a piezoelectric ceramic as actuator to move a membrane (diaphragm) up and down as a piston. Consequently, there is a sequence of increase and decrease in the chamber volume that will force the fluid in and out of the pump. The direction of the flow is guaranteed by valves that privilege the flow in just one pumping direction. The main objective of this work is the study of a methodology to develop a low cost valve-less piezoelectric diaphragm flow pump. A sensitivity analysis is carried using computational simulation through the Finite Element Method (FEM) to study how construction parameters and assembly affect diaphragm flow pump performance. Using CFD simulations through the Finite Volume Method (FVM), a sensitivity analysis is done around nozzle/diffuser element geometrical parameters and pump characteristic curves are obtained. Finally, computational results are validated by prototype construction and characterization. The text presents methodologies employed and discusses the obtained results, analyzing the principle and the related physical phenomena.

CONTEÚDO

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas

Lista de Símbolos

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Bombas de Fluxo Piezelétricas de Diafragma	3
1.2	Justificativa	6
1.3	Objetivos	6
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
2.1	Princípio de Funcionamento	8
2.2	Cerâmicas Piezelétricas.....	9
2.3	Atuadores Piezelétricos.....	11
2.4	MEF Piezelétrico.....	12
2.4.1	Análise Modal	13
2.4.2	Análise Harmônica.....	14
2.4.3	Análise Transiente.....	15
2.5	Método de Volumes Finitos Baseado em Elementos para Simulação de Escoamento de Fluido	16
3	MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	19
3.1	Metodologia do Estudo Computacional.....	19
3.2	Descrição dos Elementos Utilizados no ANSYS.....	20
3.3	Condições de Contorno Móveis	22
3.4	Linguagem APDL	22
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	24
4.1	Fabricação de Protótipo.....	24
4.2	Testes Preliminares	25

4.3	Determinação do Amortecimento do Sistema.....	26
4.4	Ensaio de Vazão.....	27
4.5	Ensaio de Pressão Estática	28
5	RESULTADOS.....	29
5.1	Modelo Computacional do Atuador Piezelétrico no Ar.....	29
5.2	Análises de Sensibilidade.....	32
5.2.1	Comprimento dos Bocais de Entrada e Saída da Bomba de Fluxo.....	33
5.2.2	Diâmetro das Válvulas	35
5.2.3	Altura da Câmara	36
5.2.4	Excentricidade do Atuador Piezelétrico.....	37
5.3	Análises de Sensibilidade Baseada nas Simulações de Escoamento de Fluido. 38	
5.4	Modelo Computacional de Escoamento de Fluido Completo Final da Bomba de Fluxo de Diafragma.....	42
5.5	Curvas Características da Bomba de Fluxo de Diafragma.....	47
5.5.1	Curvas de Vazão x Frequência.....	47
5.5.2	Curvas de Pressão x Frequência.....	48
5.5.3	Curvas de Pressão x Vazão	50
5.5.4	Curvas de Vazão x Voltagem.....	51
5.5.5	Curvas de Pressão x Voltagem.....	52
6	CONCLUSÕES	53
7	TRABALHOS FUTUROS	54
8	REFERÊNCIAS	55
	APÊNDICE A: PROGRAMAS EM APDL	59
	APÊNDICE B: DESENHOS TÉCNICOS DO PROTÓTIPO FABRICADO.....	65

Lista de Figuras

Figura 1.1: Classificação de bombas e microbombas (LASER; SANTIAGO, 2004).	2
Figura 1.2: Bomba de fluxo oscilatória.	3
Figura 1.3: Bomba de fluxo ondulatória.	3
Figura 1.4: Bomba de fluxo de Van Lintel et al. (a). Bomba de fluxo de Esashi et al. com válvulas do tipo “tampão” (b). Bomba de fluxo de Carrozza et al. com válvulas de esfera (c). Bomba de fluxo com válvulas tipo “cantilever” (d).	4
Figura 1.5: Bomba de fluxo do tipo “valve-less” (STEMME; STEMME, 1993).	5
Figura 2.1: Etapas de sucção e de descarga de fluido.	8
Figura 2.2: Deformação longitudinal (a) e transversal (b) das cerâmicas piezelétricas.	11
Figura 2.3: Disco piezelétrico e diafragma (a). Vista esquemática lateral de um disco piezelétrico (b).	11
Figura 3.1: Etapas do estudo computacional.	20
Figura 3.2: Elemento SOLID98 (a); Elemento FLUID30 (b).	21
Figura 3.3: Exemplo de malha de elementos em tempos diferentes utilizando ALE.	22
Figura 4.1: Desenho em vista explodida do protótipo fabricado.	24
Figura 4.2: Desenho em vista isométrica do protótipo fabricado.	24
Figura 4.3: Vista isométrica do protótipo montado.	25
Figura 4.4: Gerador de função INOVEO FG1000.	26
Figura 4.5: MTI-2100 Fotonic.	27
Figura 4.6: Ensaio de vazão.	28
Figura 4.7: Ensaio de pressão.	28
Figura 5.1: Desenho esquemático do modelo do atuador piezelétrico.	30
Figura 5.2: Malha de elementos do modelo do atuador piezelétrico.	30
Figura 5.3: Curvas de impedância elétrica e deslocamento em função da frequência para os 1º e 2º modos em meio ar.	31
Figura 5.4: Modos de vibrar do atuador piezelétrico no ar: (a) 1º modo e (b) 2º modo.	32
Figura 5.5: Desenho esquemático do modelo acústico base adotado.	33
Figura 5.6: Malha de elementos do modelo acústico base adotado.	33
Figura 5.7: Gráficos de impedância elétrica e amplitude de oscilação para diferentes valores de C_{bocal}	34
Figura 5.8: Malha de elementos 3D para os modelos propostos para o estudo do diâmetro de válvulas: (a) com válvulas e (b) sem válvulas.	35
Figura 5.9: Gráfico Impedância x Frequência e Amplitude x Frequência para estudo do diâmetro de válvulas.	35
Figura 5.10: Resultados da análise de sensibilidade em torno da altura da câmara.	36
Figura 5.11: Desvio excêntrico no atuador piezelétrico.	37
Figura 5.12: Resultados da análise de sensibilidade em torno da excentricidade do atuador piezelétrico.	38
Figura 5.13: Desenho esquemático do parâmetros das válvulas estudado.	38
Figura 5.14: Malha de volumes finitos do modelo simplificado com 26.756 volumes e 8.761 nós e as condições de contorno.	39
Figura 5.15: Vazão média para $c_{válvula}=6\text{mm}$	41
Figura 5.16: Vazão média para $c_{válvula}=7\text{mm}$	41

Figura 5.17: Vazão média para $c_{v\grave{a}lvula}=8mm$.	42
Figura 5.18: Desenho esquemático do modelo completo final.	43
Figura 5.19: Malha do modelo completo com 42.873 volumes e 9.333 nós.	44
Figura 5.20: Vetores de velocidade na fase de sucção.	44
Figura 5.21: Vetores de velocidade na fase de descarga.	45
Figura 5.22: Campo de pressões na fase de sucção.	45
Figura 5.23: Campo de pressões na fase de descarga.	45
Figura 5.24: Curva de vazão do modelo completo.	46
Figura 5.25: Curva de pressão do modelo completo.	46
Figura 5.26: Gráfico de vazão em função da frequência para excitação em 320 Vpp.	47
Figura 5.27: Seqüência do teste de vazão.	48
Figura 5.28: Gráfico de pressão em função da frequência para excitação em 320 Vpp.	49
Figura 5.29: Seqüência do teste de pressão.	49
Figura 5.30: Gráfico de pressão em função da vazão para o atuador excitado em 45 Hz e 320 Vpp.	50
Figura 5.31: Curva de vazão em função da voltagem para excitação em 45 Hz.	51
Figura 5.32: Curva de pressão em função da voltagem para excitação em 45 Hz.	52
Figura 7.1: Desenho esquemático da bomba de fluxo piezelétrica de diafragma de dois atuadores.	54
Figura 7.2: Desenho esquemático da configuração em série da bomba de fluxo piezelétrica de diafragma “valve-less”.	54

Lista de Tabelas

Tabela 5.1: Propriedades dos materiais utilizados nos modelos.....	29
Tabela 5.2: Resultados da análise de sensibilidade C_{bocal}	34

Lista de Abreviaturas

ALE	Arbitrary Lagrangian-Eulerian
APDL	ANSYS Parametric Design Language
CFD	Computational Fluid Dynamics
CVFEM	Control-Volume Finite Element Method
EbFVM	Element-based Finite Volume Method
FSI	Fluid Solid Interface
MEF	Método de Elementos Finitos
PZT5A	Titanato Zirconato de Chumbo
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo

Lista de Símbolos

T	vetor das tensões elétricas
D	vetor deslocamento elétrico
c^E	matriz de rigidez elástica obtido com o campo elétrico constante
S	vetor de deformação mecânica
e	matriz de coeficientes piezelétricos de tensão mecânica
ε^S	vetor dielétrico medido com deformação constante
E	vetor campo elétrico
<i>t</i>	transposta da matriz
<i>x, y, z</i>	coordenadas globais cartesianas
<i>f</i>	frequência
<i>ω</i>	velocidade angular
<i>C</i>	constante
<i>j</i>	$\sqrt{-1}$
<i>V</i>	diferença de potencial elétrico
<i>V_{pp}</i>	volts pico a pico
<i>I</i>	corrente elétrica
<i>Z</i>	impedância elétrica
<i>Q</i>	carga elétrica
<i>ρ</i>	densidade
<i>ρ_{H₂O}</i>	densidade da água
<i>ρ_{latão}</i>	densidade do latão
<i>ρ_{PZT}</i>	densidade do PZT
<i>g_z</i>	gravidade no eixo <i>z</i>
<i>μ</i>	viscosidade
<i>u</i>	velocidade no eixo <i>x</i>
<i>v</i>	velocidade no eixo <i>y</i>
<i>w</i>	velocidade no eixo <i>z</i>
<i>p</i>	pressão
<i>ΔL</i>	comprimento do tubo de vidro conhecido
<i>$\bar{V}$</i>	velocidade média
<i>V_{max}</i>	velocidade máxima
<i>H</i>	altura da coluna d'água
<i>v_s</i>	velocidade de propagação da onda acústica
<i>ν</i>	coeficiente de Poisson
<i>E</i>	módulo de elasticidade
<i>d</i>	diâmetro da cerâmica piezelétrica
<i>D</i>	diâmetro da membrana
<i>D_{maior}</i>	diâmetro maior do elemento difusor/bocal
<i>D_{menor}</i>	diâmetro menor do elemento difusor/bocal
<i>D_{cam}</i>	diâmetro da câmara
<i>h</i>	altura da câmara
<i>c_{bocal}</i>	comprimento do bocal
<i>c_{válvula}</i>	comprimento da válvula
<i>e</i>	excentricidade do atuador
<i>t</i>	tempo
<i>A</i>	amplitude

1 INTRODUÇÃO

Dentre as aplicações de cerâmicas piezelétricas, uma que tem sido pesquisada é a construção de bombas de fluxo de precisão, ou seja, bombas de pequena potência para deslocamento de pequenos volumes de fluido (LASER; SANTIAGO, 2004). A Bioengenharia é a área que tem demonstrado grande interesse por este tipo de equipamento. Uma possível aplicação dessas bombas de fluxo na Bioengenharia é a dosagem de medicamentos (TEYMOORI; ABBASPOUR-SANI, 2005), como por exemplo, injeção contínua de insulina em pacientes diabéticos durante o dia, eliminando surtos e déficits dessa substância, ou ainda, o bombeamento de fluidos biológicos (ANDRADE et al., 1996). Outro exemplo de aplicação é a dosagem precisa de reagentes em equipamentos portáteis de análises clínicas.

Outra área que tem mostrado interesse nesse tipo de bomba de fluxo é a de sistemas de refrigeração para equipamentos eletrônicos (SINGHAL et al., 2004) como “notebooks” e microcomputadores de alto desempenho em componentes, como por exemplo, processadores. Sistemas de refrigeração a água de processadores em microcomputadores de alto desempenho vem sendo desenvolvidos nos últimos anos, como alternativa aos métodos convencionalmente utilizados, que consistem no uso de ventilação a ar, compostos por um dissipador de calor e um pequeno ventilador. Em geral, sistemas a ar não são dimensionados adequadamente por desconhecimento do funcionamento do dissipador e do ventilador e, como consequência, o microcomputador fica instável, ocasionando, na pior hipótese, a queima do processador. A utilização de um sistema de refrigeração a água baseado em bombas de fluxo de precisão oferece como diferenciais: maior capacidade de refrigeração, redução na emissão de ruídos, grande potencial de miniaturização, além de um número reduzido de peças, visando suprir as atuais demandas tecnológicas dessa aplicação.

As bombas de fluxo de precisão podem ser classificadas de acordo com o princípio de bombeamento utilizado para gerar vazão e pressão, conforme descrito na figura 1.1. Grande parte desses princípios é baseada no uso de atuadores piezelétricos (LASER; SANTIAGO, 2004; GARIMELLA; SINGHAL; LIU, 2006).

Figura 1.1: Classificação de bombas e microbombas (LASER; SANTIAGO, 2004).

Um exemplo de princípio de bomba de fluxo piezelétrica para aplicação em eletrônica que vem sendo estudado pelo grupo de pesquisa no Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica é a bomba de fluxo oscilatória (NAKASONE et al., 2005), que utiliza o princípio oscilatório do nadar dos peixes. Essa bomba de fluxo utiliza um atuador que possui o formato de uma lâmina e, quando acionado com uma tensão elétrica alternada, produz o movimento desejado, conforme mostra a figura 1.2.

Figura 1.2: Bomba de fluxo oscilatória.

Outro princípio estudado na literatura é a bomba de fluxo piezelétrica ondulatória. Pode-se ilustrar, como exemplo, a bomba de fluxo ultra-sônica (MIYAZAKI et al., 1991; BAR-COHEN; CHANG, 2001), que utiliza estatores feitos de material elástico atuados por cerâmicas piezelétricas e que movimentam o fluido através do princípio da propagação de onda. O fluido é arrastado devido ao movimento da onda propagante no meio sólido, gerando um efeito semelhante ao peristaltismo observado no esôfago e no intestino humano.

Figura 1.3: Bomba de fluxo ondulatória.

1.1 Bombas de Fluxo Piezelétricas de Diafragma

Os princípios de bombeamento expostos anteriormente priorizam a geração de vazão em detrimento da pressão. Para aplicações em resfriamento de componentes eletrônicos, muitas vezes, é necessário pressão para que as perdas de carga localizadas no trocador de calor, dissipador e tubulação não interfiram no

escoamento de modo significativo. Pode-se conseguir maiores pressões utilizando-se o princípio de diafragma.

A primeira bomba de fluxo piezelétrica baseada no princípio de diafragma foi apresentada por Van Lintel et al. (VAN LINTEL et al., 1988). Essa bomba de fluxo utiliza válvulas passivas do tipo “diafragma”. As válvulas do tipo “diafragma” consistem de um anel externo flexível e de um anel rígido central. A pressão atuante nesse tipo de válvula deflete o anel externo flexível e, portanto, sela o anel interno.

Esashi et al. (ESASHI; SHOJI; NAKANO, 1989) propôs uma bomba de fluxo piezelétrica onde o diafragma é conectado a um atuador piezelétrico do tipo “stack”. As válvulas passivas consistem de válvulas do tipo “tampão”.

Em 1995, Carrozza et al. (CARROZZA et al., 1995) propôs uma nova configuração de bomba de fluxo de diafragma que utiliza válvulas de esfera para retificar o fluxo.

Outro tipo de válvula bastante explorada na literatura é a do tipo “cantilever” (ZENGERLE et al., 1995). Esse tipo de válvula tem a estrutura de uma viga engastada, que flete com a pressão atuante para permitir a passagem do fluxo.

Figura 1.4: Bomba de fluxo de Van Lintel et al. (a). Bomba de fluxo de Esashi et al. com válvulas do tipo “tampão” (b). Bomba de fluxo de Carrozza et al. com válvulas de esfera (c). Bomba de fluxo com válvulas tipo “cantilever” (d).

Nos trabalhos apresentados acima (figura 1.4), a direção do fluxo é garantida por válvulas passivas que permitem o fluxo num único sentido. Porém, bombas de

fluxo com partes móveis podem ter problemas como elevadas quedas de pressão através da válvula e fadiga. Além disso, a frequência de ressonância das válvulas passivas deve ser próxima da frequência de ressonância do atuador. Isso se deve ao fato de que é necessário obter uma sincronia de movimentos entre a expansão e contração do diafragma e a abertura e fechamento das válvulas sob o risco da bomba de fluxo cavar. Somado a isso, são de difícil miniaturização e de difícil fabricação, o que resulta em bombas de fluxo de altíssimo custo. Portanto, em diversas aplicações, é necessária a utilização de bombas de fluxo sem partes móveis, entre as quais se destacam as bombas de fluxo do tipo “valve-less”, ou seja, sem-válvulas (STEMME; STEMME, 1993; OLSSON; STEMME; STEMME, 1998; ULLMANN; FONO; TAITEL, 2001; ZHANG, 2005). A figura 1.5 ilustra uma bomba de fluxo do tipo “valve-less”.

Figura 1.5: Bomba de fluxo do tipo “valve-less” (STEMME; STEMME, 1993).

Uma ampla revisão bibliográfica sobre os tipos de bombas de fluxo de diafragma pode ser vista em Laser e Santiago (LASER; SANTIAGO, 2004) e Singhal et al. (SINGHAL et al., 2004). Apesar do princípio de diafragma ser explorado há muitos anos, os trabalhos científicos (STEMME; STEMME, 1993; ULLMANN et al., 2001; BU et al., 2003 ; NÓBREGA; CAMPOS, 2007) até o momento estavam, de certo modo, limitados no que diz respeito à simulação computacional.

Portanto, o presente trabalho visa estudar a metodologia de desenvolvimento de uma bomba de fluxo piezelétrica de baixo custo baseada no princípio de diafragma “valve-less”, através da modelagem pelo método de elementos finitos, bem como a construção e caracterização de protótipos. Serão apresentadas adiante as metodologias empregadas e a discussão dos resultados obtidos, de forma a analisar o princípio e os fenômenos físicos em questão.

1.2 Justificativa

Pelo exposto anteriormente, o desenvolvimento de bombas de fluxo de precisão, ou seja, bombas de pequena potência para deslocamento de pequenos volumes de fluido, vem ocorrendo em diversas áreas, como a Bioengenharia e sistemas de refrigeração para equipamentos eletrônicos.

As simulações computacionais mostram ser relevantes para o estudo do problema proposto, uma vez que uma formulação e solução analítica detalhada para este sistema seriam demasiadamente complexas, como será explicado mais adiante. Dessa forma, neste projeto de mestrado, decidiu-se focar a simulação computacional da bomba. A análise de sensibilidade para o problema da bomba seria muito custosa caso a simulação computacional não fosse utilizada, uma vez que é pouco viável construir um número de protótipos grande o suficiente para se levantar uma curva de resposta para um sistema como o da bomba de fluxo em questão.

Embora haja várias pesquisas em andamento em torno de princípios para bombeamento de fluido utilizando atuadores piezelétricos, como os relatados anteriormente, é um campo de pesquisa ainda pouco explorado.

Pode-se obter, através do princípio de diafragma “valve-less”, uma bomba de fluxo de baixíssimo custo, pois sua fabricação utiliza métodos convencionais de usinagem e o atuador utilizado nesse de tipo de bomba de fluxo é facilmente encontrado no mercado a um custo reduzido.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma bomba de fluxo piezelétrica de diafragma do tipo “valve-less” utilizando a modelagem por Método dos Elementos Finitos (MEF) e a construção e caracterização de protótipos.

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Estudar o princípio de diafragma e propor uma configuração de bomba de fluxo piezelétrica de baixo custo baseada nesse princípio;
- Simular a configuração de bomba de fluxo de diafragma proposta através da modelagem e simulação pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando o software ANSYS;

- Analisar os parâmetros de construção da bomba e suas influências em seu funcionamento;
- Validar os resultados obtidos computacionalmente através da construção de protótipos (dimensões da ordem de centímetros) e realização de testes experimentais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para uma melhor compreensão do trabalho realizado, a seguir, estão descritos os principais conceitos abordados.

2.1 Princípio de Funcionamento

A bomba piezelétrica com diafragma utiliza o material piezelétrico como atuador para mover uma membrana (diafragma). É por meio dessa deformação que se consegue o efeito de bombeamento que proporciona um fluxo de fluido através da bomba de fluxo. Pode-se dizer que a cerâmica piezelétrica tem atuação semelhante à de um pistão, aumentando e diminuindo o volume da câmara.

Figura 2.1: Etapas de sucção e de descarga de fluido.

As bombas de fluxo do tipo “valve-less”, exploradas neste trabalho, baseiam-se nas propriedades dos elementos bocal/difusor de entrada e saída de fluido da câmara da bomba de fluxo, onde a queda de pressão na direção do difusor é menor que a queda de pressão na direção do bocal, considerando-se a mesma velocidade de fluxo para ambas as direções. Durante a fase de sucção (figura 2.1a), quando o volume da câmara da bomba de fluxo aumenta, o canal de entrada atua com baixa restrição a entrada de fluido na cavidade, ou seja, atua como difusor. Enquanto que o canal de saída atua com alta resistência a saída de fluido da cavidade, ou seja, atua

como bocal. Durante a fase de descarga (figura 2.1b), quando o volume da cavidade diminui, uma maior quantidade de fluido sai da câmara através do canal de saída, que nesta situação atua como difusor, enquanto que o canal de entrada atua como bocal, expulsando uma pequena quantidade de fluido. O resultado para um ciclo completo de bombeamento é um transporte de fluido da entrada para a saída da bomba de fluxo (figura 2.1c), apesar do sistema bocal/difusor transportar fluido nas duas direções.

2.2 Cerâmicas Piezelétricas

Os materiais piezelétricos são materiais específicos que se contraem e se expandem de acordo com a tensão elétrica aplicada em seus terminais e vice-versa, gerando deformação no sentido longitudinal e transversal de acordo com a excitação aplicada e o sentido de polarização, como mostra a figura 2.2.

Devido a essa característica, os materiais piezelétricos são geralmente usados em acelerômetros, sensores de pressão e força, transdutores de ultra-som, atuadores, nanoposicionadores, giroscópios, entre outros dispositivos de mecânica de precisão.

As equações constitutivas do efeito piezelétrico são (IKEDA, 1996):

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^t \mathbf{E} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\epsilon}^S \mathbf{E} + \mathbf{e} \mathbf{S} \quad (2.2)$$

onde:

$\mathbf{T}$ = vetor das tensões mecânicas;

$\mathbf{D}$ = vetor deslocamento elétrico;

$\mathbf{c}^E$ = matriz de rigidez elástica obtido com campo elétrico constante;

$\mathbf{S}$ = vetor de deformação mecânica;

$\mathbf{e}$ = matriz de coeficientes piezelétricos de tensão mecânica;

$\boldsymbol{\epsilon}^S$ = vetor dielétrico medido com deformação constante;

$\mathbf{E}$ = vetor campo elétrico;

t = transposta da matriz.

e são dados por (IKEDA, 1996):

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{12} \\ T_{13} \\ T_{23} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$S_{jk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) \quad (2.8)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi, \text{ onde } \phi \text{ é o potencial elétrico} \quad (2.9)$$

Figura 2.2: Deformação longitudinal (a) e transversal (b) das cerâmicas piezelétricas.

2.3 Atuadores Piezelétricos

Neste trabalho são analisadas as bombas de fluxo de diafragma com atuação piezelétrica, as quais possuem um atuador, como o da figura 2.3a, formado por três camadas: a camada de cerâmica piezelétrica, a camada de cola e a membrana passiva. Esses atuadores estão amplamente disponíveis no mercado a um baixo custo (cotado em julho/2009 em torno de R\$ 1,00).

Figura 2.3: Disco piezelétrico e diafragma (a). Vista esquemática lateral de um disco piezelétrico (b).

Quando se aplica um campo elétrico nos terminais da cerâmica, ela apresenta uma deflexão na direção perpendicular a sua superfície. Assim, o atuador apresenta uma deformação convexa ou côncava, devido a sua forma e à fixação da membrana, como pode ser visto na figura 2.3b. É por meio dessa deformação que se consegue o efeito de bombeamento que proporciona um fluxo de fluido através da bomba de

fluxo. Pode-se dizer que a cerâmica piezelétrica tem atuação semelhante à de um pistão, pois quando o diafragma se move de forma a reduzir o volume da câmara, tem-se a saída de fluido da bomba de fluxo. Quando o atuador se deforma aumentando o volume da câmara, tem-se a entrada de fluido na câmara.

2.4 MEF Piezelétrico

A utilização do método de elementos finitos é justificada em situações nas quais a solução analítica exata de um dado problema é demasiadamente complexa ou mesmo quando não há uma formulação analítica disponível, inviabilizando a sua solução e exigindo a adoção de restrições e hipóteses que acabariam por comprometer os resultados, como neste caso.

Além disso, um item importante refere-se à caracterização do equipamento, feita de maneira bem mais eficiente através de simulação computacional, havendo assim, uma diminuição do número de protótipos a serem construídos e ensaiados, além da possibilidade de determinação de parâmetros ótimos de funcionamento e curvas de resposta.

A simulação computacional permite também o estudo de sensibilidade dos parâmetros geométricos ótimos da bomba, bem como permite analisar quais são os parâmetros críticos que influenciam o desempenho da bomba de fluxo. Portanto, é importante na fase de fabricação, pois determina para quais parâmetros deve-se atentar a fim de se obter uma boa fabricação e montagem e garantir um bom funcionamento da bomba de fluxo.

Neste trabalho, portanto, as simulações computacionais de atuadores piezelétricos são realizadas utilizando o MEF. A seguir, é discutida brevemente sua aplicação para elementos piezelétricos e o desenvolvimento de suas equações.

A formulação do MEF piezelétrico pode ser escrita em termos do deslocamento $\{ \mathbf{U} \}$ e do potencial elétrico $\{ \Phi \}$ para cada nó, sendo que os esforços mecânicos são expressos em termos de $\{ \mathbf{F} \}$ e as cargas elétricas em termos de $\{ \mathbf{Q} \}$, resultando nas equações abaixo (LERCH, 1990):

$$[\mathbf{M}_{uu}]\{\ddot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{C}_{uu}]\{\dot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{K}_{uu}]\{\mathbf{U}\} + [\mathbf{K}_{u\phi}]\{\Phi\} = \{\mathbf{F}\} \quad (2.10)$$

$$[\mathbf{K}_{u\phi}]^T \{\mathbf{U}\} + [\mathbf{K}_{\phi\phi}]\{\Phi\} = \{\mathbf{Q}\} \quad (2.11)$$

Essa expressão pode, também, ser expressa na forma matricial (LERCH, 1990):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{uu} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{uu} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{u\phi}^T & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

onde, para cada elemento e (LERCH, 1990):

$$\text{Matriz de rigidez mecânica: } [\mathbf{K}_{uu}]_e = \int_{V_e} [\mathbf{B}_u]^T [\mathbf{c}] [\mathbf{B}_u] dV_e \quad (2.13)$$

$$\text{Matriz de acoplamento piezelétrico: } [\mathbf{K}_{u\phi}]_e = \int_{V_e} [\mathbf{B}_u]^T [\mathbf{e}] [\mathbf{B}_\phi] dV_e \quad (2.14)$$

$$\text{Matriz de rigidez elétrica: } [\mathbf{K}_{\phi\phi}]_e = \int_{V_e} [\mathbf{B}_\phi]^T [\boldsymbol{\varepsilon}] [\mathbf{B}_\phi] dV_e \quad (2.15)$$

$$\text{Matriz de massa: } [\mathbf{M}_{uu}]_e = \rho \int_{V_e} [\mathbf{N}_u]^T [\mathbf{N}_u] dV_e \quad (2.16)$$

$$\text{Matriz de amortecimento: } [\mathbf{C}_{uu}]_e = \alpha [\mathbf{M}_{uu}]_e + \beta [\mathbf{K}_{uu}]_e \quad (2.17)$$

e

β : constante de amortecimento multiplicadora da matriz de rigidez e

α : constante de amortecimento multiplicadora da matriz de massa

2.4.1 Análise Modal

Varrendo-se a frequência do sinal elétrico senoidal de excitação que é aplicado no atuador piezelétrico, a corrente elétrica aumenta, bem como a potência elétrica, até que numa determinada frequência, a corrente elétrica e a potência elétrica atingem seus valores máximos. Esta frequência é denominada de frequência de ressonância.

Aumentando-se mais a frequência do sinal elétrico senoidal de excitação, a corrente elétrica diminui assim como a potência elétrica, até o valor da impedância elétrica atingir um máximo local. Neste ponto é definida a frequência de anti-ressonância.

Na análise de atuadores piezelétricos é necessário obter as frequências naturais. Para isso utiliza-se a análise modal. Essa análise consiste na solução das

equações 2.10 e 2.11 na forma de um problema de autovalores e autovetores. Assim, assumindo $\mathbf{F} = \mathbf{0}$ nas equações 2.10 e 2.11, tem-se (LERCH, 1990):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{uu} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{u\phi}^T & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \mathbf{Q} \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

Para $\mathbf{Q} = 0$ na equação acima, obtém-se um problema de autovalor e autovetor que permite calcular a frequência de anti-ressonância. Para a obtenção da frequência de ressonância, basta curto-circuitar os eletrodos e considerar o sistema da equação 2.18, eliminando-se as equações que envolvem os nós dos eletrodos, obtém-se o problema de autovalor e autovetor correspondente (WU et al., 2003).

2.4.2 Análise Harmônica

As cerâmicas piezelétricas dos atuadores são excitadas com ondas de tensão elétricas senoidais (harmônicas). A análise harmônica permite a investigação da estrutura piezelétrica sob a influência de força, cargas elétricas, deslocamentos e/ou voltagens harmônicas. Forças e cargas elétricas podem ser expressas da seguinte forma:

$$\{\mathbf{F}(t)\} = \{\mathbf{F}\}e^{j\omega t}; \{\mathbf{Q}(t)\} = \{\mathbf{Q}\}e^{j\omega t} \quad (2.19)$$

e os deslocamentos e o potencial elétrico são dados por:

$$\{\mathbf{U}(t)\} = \{\mathbf{U}\}e^{j\omega t}; \{\Phi(t)\} = \{\Phi\}e^{j\omega t} \quad (2.20)$$

onde ω é a frequência de excitação.

Vale lembrar que esses valores de $\{\mathbf{U}\}$, $\{\Phi\}$, $\{\mathbf{F}\}$ e $\{\mathbf{Q}\}$ apresentam números reais quando não há amortecimento e, números complexos quando há amortecimento no sistema, o que significa a adição de um deslocamento de fase. Substituindo as equações 2.19 e 2.20 nas equações de equilíbrio piezelétricas 2.10 e 2.11, obtém-se (LERCH, 1990):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} + j\omega\mathbf{C}_{uu} - \omega^2\mathbf{M}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{u\phi}^T & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{U}} \\ \hat{\Phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{F}} \\ \frac{1}{j\omega}\hat{\mathbf{I}} \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

Sendo que $\sim$ representa matrizes complexas. A análise harmônica permite determinar as respostas em frequência da estrutura piezelétrica (OSTERGAARD; PAWLAK, 1987; LERCH, 1990), como do deslocamento e da impedância elétrica.

A princípio, o amortecimento do sistema é desconhecido. Dessa forma, não seria possível determinar o deslocamento da estrutura piezelétrica. Neste trabalho, são realizadas medições de deslocamento do atuador piezelétrico em situação de trabalho com auxílio do aparelho MTI-2100 Fotonic da MTI Instruments. De posse dos valores medidos de deslocamento, é possível calibrar o amortecimento no modelo computacional. Portanto, desta maneira, é possível obter computacionalmente valores de deslocamento a partir das análises harmônicas.

O software comercial ANSYS fornece como resposta, o valor da carga elétrica na forma complexa Q de cada elemento piezelétrico. A partir de Q , calcular a impedância elétrica Z do elemento da seguinte forma (NADER, 2002):

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V}{j\omega Q} \quad (2.22)$$

onde:

- V = diferença de potencial elétrico;
- I = corrente elétrica;
- ω = velocidade angular de excitação;
- Q = carga elétrica.

A partir da equação 2.22 é possível obter a curva de impedância elétrica em função da frequência de excitação.

2.4.3 Análise Transiente

Essa análise consiste em se resolver as equações 2.10 e 2.11 em que $F(t)$ e $Q(t)$ são funções no tempo. Deve-se, então, definir a função de excitação, especificando-se o valor da função para diferentes incrementos de tempo. A função é dividida nos chamados passos de carga, cada um contendo um ou mais incrementos

de tempo. Para a solução do problema transiente o ANSYS utiliza o método numérico de Newmark (OSTERGAARD; PAWLAK, 1987). Trata-se de um método de integração direta implícito, em que as equações 2.10 e 2.11 são resolvidas entre um instante de tempo e o próximo. O método interpreta $[M_{uu}]\{\ddot{U}\}$ e $[C_{uu}]\{\dot{U}\}$ como forças de inércia e viscosa, respectivamente, e impõe o equilíbrio estático em cada instante de tempo seguinte.

2.5 Método de Volumes Finitos Baseado em Elementos para Simulação de Escoamento de Fluido

A simulação computacional para problemas envolvendo fluidos é comumente denominada CFD (“Computational Fluid Dynamics”), sendo uma área bastante ampla. A simulação de bombas de fluxo dos mais diversos tipos é feita a partir de ferramentas de CFD para auxílio em seus projetos, promovendo um aumento no desempenho das mesmas (VOORDE; VIERENDEELS; DICK, 2004; BURGREN et al., 2001; GULICH, 1999).

O software utilizado nas simulações de escoamento de fluido é o ANSYS CFX, que utiliza o método de volumes finitos baseado em elementos. O método de volumes finitos baseado em elementos foi desenvolvido originalmente para resolver escoamentos descritos pelas equações de Navier-Stokes. A idéia geral do método foi proposta inicialmente por Baliga e Patankar (BALIGA; PATANKAR, 1980), no início da década de oitenta, para a solução de equações de advecção-difusão. Posteriormente a metodologia foi estendida por esses mesmos autores para a resolução de problemas mais gerais de mecânica dos fluidos e transferência de calor (BALIGA; PATANKAR, 1983). Nesses trabalhos foram consideradas malhas não-estruturadas de elementos triangulares como base geométrica para construir volumes de controle unindo os centróides de cada triângulo com os pontos médios dos seus lados. As equações diferenciais de conservação eram integradas em cada um de tais volumes de controle para a obtenção de equações aproximadas que respeitassem a conservação das grandezas físicas no nível discreto. Foram esses autores que propuseram também o nome de *Control-Volume Finite Element Method* (CVFEM) para este método, com o qual é mais conhecido na literatura. Contudo, conforme argumenta Maliska (MALISKA, 2004), essa denominação é imprecisa, pois sugere

que se trata de um método que segue a filosofia do método de elementos finitos e que também emprega volumes de controle. Entretanto, conforme mencionado acima, a realidade é que se trata de um método construído com a base conceitual do método de volumes finitos e que apenas emprega o conceito de elemento para a representação geométrica do domínio de solução. Por tal razão, é mais adequada a denominação *Element-based Finite Volume Method* (EbFVM) ou método de volumes finitos baseado em elementos, a qual é utilizada neste trabalho. A seguir, as equações do problema de escoamento de fluidos são brevemente apresentadas.

O problema de escoamento de fluidos é definido pelas leis de conservação de massa, quantidade de movimento (FOX; MCDONALD, 2006), pela equação da continuidade (equação 2.23) e pelas equações diferenciais de Navier-Stokes (equações 2.24, 2.25 e 2.26) para fluidos incompressíveis, as quais são descritas a seguir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.23)$$

$$\text{Dir. } x: \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.24)$$

$$\text{Dir. } y: \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.25)$$

$$\text{Dir. } z: \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.26)$$

As propriedades utilizadas acima são:

$$\begin{aligned} \rho : \text{densidade} \left[\frac{kg}{m^3} \right] & \quad \mu : \text{viscosidade} \left[\frac{N.s}{m^2} \right] & \quad p : \text{pressão} \left[\frac{N}{m^2} \right] \\ g_z : \text{gravidade em } z \left[\frac{m}{s^2} \right] & \quad u, v, w : \text{velocidades em } x, y, z \left[\frac{m}{s} \right] \end{aligned}$$

O software ANSYS CFX utiliza o método de volumes finitos baseado em elementos para converter as equações que regem o fenômeno em expressões que possam ser resolvidas numericamente. O método consiste na discretização do domínio espacial em volumes de controle finitos, utilizando uma malha. As equações

regentes são integradas sobre cada volume de controle, gerando equações discretas que garantem a conservação de massa, quantidade de movimento e energia para cada volume de controle (ANSYS, 2007).

O ANSYS CFX emprega o algoritmo de solução acoplado para a solução dos sistemas. O algoritmo acoplado resolve as equações regentes de conservação de massa, quantidade de movimento e energia simultaneamente. Outras equações escalares são resolvidas de maneira seqüencial, ou seja, desacopladas (ANSYS, 2007).

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

3.1 Metodologia do Estudo Computacional

A metodologia empregada no estudo computacional deste trabalho envolve quatro etapas principais.

O primeiro passo, ilustrado pela primeira etapa da figura 3.1, consiste em definir um modelo computacional simplificado de um atuador piezelétrico em meio ar, utilizando análises harmônicas. O objetivo desta etapa é conseguir um modelo no ar que apresente frequências de ressonância próximas ao atuador real. O atuador piezelétrico real é ensaiado no impedômetro HEWLETT PACKARD 4194A para obtenção das frequências de ressonância. De posse das frequências de ressonância do atuador piezelétrico real, o modelo computacional do atuador piezelétrico é validado.

Após essa primeira etapa, são realizadas análises de sensibilidade a partir de simulações harmônicas com o objetivo de estudar a influência de parâmetros construtivos e de montagem da bomba de fluxo de diafragma. Nesta etapa a água é considerada como meio fluido. Através das análises harmônicas é possível obter os modos de vibrar, as novas frequências de ressonância e amplitude de oscilação dos atuadores piezelétricos. A posse destes resultados possibilita a realização de análises qualitativas para avaliar a influência de cada parâmetro na bomba de fluxo. A segunda etapa é ilustrada na figura 3.1.

O próximo passo é realizar uma análise de sensibilidade com o enfoque nas válvulas através de simulações de escoamento de fluido. Para a realização desta etapa, a curva de deslocamento e frequência de oscilação do atuador piezelétrico é imposta na simulação de escoamento de fluido e, como resultado, são obtidas a vazão e a pressão de cada válvula estudada. Esta etapa pode ser representada pela terceira etapa da figura 3.1. O objetivo principal nesta etapa é obter a geometria de válvula que maximiza a vazão e a pressão.

A última etapa consiste em compilar todos os dados obtidos nas etapas anteriores e desenvolver um modelo computacional final. Com o modelo computacional pronto, são realizadas simulações de escoamento de fluido da bomba de fluxo completa. Este modelo é, posteriormente, validado pelos ensaios

experimentais. A partir do modelo computacional final são obtidas todas as curvas características de vazão e pressão da bomba de fluxo (ver figura 3.1).

Figura 3.1: Etapas do estudo computacional.

3.2 Descrição dos Elementos Utilizados no ANSYS

Neste trabalho, o MEF é utilizado como ferramenta para a simulação e análise do problema da bomba de fluxo e optou-se pela utilização do software comercial ANSYS para a condução das simulações. O software ANSYS foi escolhido pelo fato de ser amplamente empregado e difundido no ramo de Engenharia em simulação de

fluidos e materiais piezelétricos e também pela grande experiência do orientador e seu grupo de trabalho com esse software.

O software conta com uma vasta biblioteca de elementos para a simulação dos mais diversos tipos de sistemas, incluindo sistemas multidisciplinares, através do pacote Multiphysics.

Para simular o comportamento do atuador no ar, é necessário criar um modelo utilizando o elemento “SOLID98”. Este elemento tetraédrico de dez nós é capaz de simular materiais como o latão e também materiais piezelétricos. Os graus de liberdade do elemento “SOLID98” são: deslocamentos em ‘x’, ‘y’, ‘z’ e tensão elétrica aplicada.

Para simular o comportamento do atuador na água é necessário criar um modelo acústico da câmara da bomba de fluxo (ANSYS, 2007), utilizando-se o elemento “FLUID30” com as propriedades da água (peso específico e velocidade de propagação do som). Os graus de liberdade do “FLUID30” são os deslocamentos em ‘x’, ‘y’, ‘z’ e pressão. O atuador piezelétrico é modelado em cima da câmara, utilizando-se o elemento “SOLID98”.

Figura 3.2: Elemento SOLID98 (a); Elemento FLUID30 (b).

As simulações no ANSYS são realizadas com o software operando em modo ‘batch’, ou seja, utilizando um arquivo de texto em linguagem APDL (*ANSYS Parametric Design Language*), descrita posteriormente.

3.3 Condições de Contorno Móveis

A descrição Lagrangeana expressa o movimento de um meio contínuo em termos da configuração inicial e do tempo (referência fixa) e é tradicionalmente usada na mecânica dos sólidos, onde o propósito das análises em geral é determinar os deslocamentos dos pontos de um corpo a partir de sua forma inicial. A descrição Euleriana, por outro lado, é definida em termos da configuração deformada e do tempo, sendo muito aplicada à mecânica dos fluidos, onde as variáveis geralmente são velocidades e não deslocamentos. Sendo o fluido modelado por uma formulação Euleriana e o sólido por uma formulação Lagrangeana (método particionado), surgem dificuldades para se analisar ambos simultaneamente. A solução para o acoplamento entre o fluido e a estrutura é descrever o fluido através da formulação Lagrangeana-Euleriana Arbitrária (ALE - *Arbitrary Lagrangian-Eulerian*) (DONEA et al., 2004).

No caso estudado, o domínio em estudo (superfícies externas ou superfícies livres) se altera com o decorrer do tempo e a malha de elementos finitos deve se alterar de forma a satisfazer esta condição. A figura 3.3 mostra um corpo rígido em movimento inserido num meio fluido. A formulação ALE permite que essas condições de contorno variáveis sejam aplicadas ao problema. No decorrer da simulação, a malha de elementos finitos se altera, possibilitando a solução do problema.

Figura 3.3: Exemplo de malha de elementos em tempos diferentes utilizando ALE.

3.4 Linguagem APDL

Nas simulações da bomba de fluxo piezelétrica é empregada a linguagem de programação APDL (*ANSYS Parametric Design Language*). Esta linguagem de programação é utilizada para automatizar funções comuns ou mesmo para a

construção de um modelo a partir de seus parâmetros ou variáveis. O APDL possibilita ainda a realização de uma série de outras funcionalidades, tais como: repetição de comandos, macros, condições “if-then-else”, loops, além de operações com vetores e matrizes. Esta linguagem é utilizada para dinamizar a criação de modelos computacionais para a bomba piezelétrica, uma vez que para alterar um determinado parâmetro, basta editar o arquivo do código-fonte e refazer a simulação, ao invés de realizar novamente toda a montagem do modelo utilizando a interface gráfica do programa.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para validação dos resultados computacionais é fabricado um protótipo experimental. Nesta seção são descritos a fabricação do protótipo, os ensaios experimentais realizados.

4.1 Fabricação de Protótipo

A figura 4.1 mostra desenho em vista explodida do protótipo fabricado, composto pelo cabeçote superior para fixação do atuador, cabeçote inferior, pelo atuador, pela câmara, por duas válvulas e por dois bocais por onde são fixadas as mangueiras para a entrada e a saída do fluido, no caso, a água. A montagem desses componentes resulta na bomba de fluxo de diafragma, como pode ser visto na figura 4.2. Os desenhos técnicos do protótipo fabricado se encontram no apêndice B.

Figura 4.1: Desenho em vista explodida do protótipo fabricado.

Figura 4.2: Desenho em vista isométrica do protótipo fabricado.

Todas as peças são usinadas no centro de usinagem CNC Deckel Maho, no Departamento de Engenharia Mecânica e Sistemas Mecatrônicos da Escola Politécnica. Os bocais e a câmara são usinados em acrílico. O engaste e as válvulas são fabricados em alumínio. No caso das válvulas (figura 4.1), os furos correspondentes aos elementos bocal/difusor são usinados por eletroerosão, após o fresamento das peças-base. Deve-se ressaltar que os elementos bocal/difusor são usinados com tolerância de 0,01 mm e as demais peças são usinadas com tolerância de 0,05 mm. A baixa tolerância de fabricação dos elementos bocal/difusor e a alta tolerância de fabricação das demais peças reforçam a importância dos elementos bocal/difusor para o funcionamento pleno do princípio “valve-less”. É possível também conseguir boa repetibilidade no desempenho da bomba de fluxo em questão, mesmo após várias remontagens. Pode-se concluir que o princípio “valve-less” é um princípio simples e robusto. A figura 4.3 mostra o protótipo montado.

Figura 4.3: Vista isométrica do protótipo montado.

4.2 Testes Preliminares

Após a construção do protótipo, é necessário mapear a frequência de ressonância do primeiro modo da bomba de fluxo de diafragma. Esta frequência é determinada na situação de trabalho da bomba de fluxo, ou seja, com a câmara da bomba totalmente preenchida com água. O acionamento do atuador piezelétrico é feito utilizando-se um gerador de função INOVEO FG1000. Deste modo a

freqüência é varrida até que se observe o maior deslocamento do atuador piezelétrico.

É necessário também verificar a vedação do protótipo. Constataram-se alguns pequenos vazamentos no protótipo. Foi utilizado isolante líquido da marca Quimatic para a vedação. Este vedante se apresenta na forma líquida, de fácil aplicação. Quando em contato com o ar, o vedante polimeriza vedando o protótipo de forma eficiente.

Figura 4.4: Gerador de função INOVEO FG1000.

4.3 Determinação do Amortecimento do Sistema

Como mencionado anteriormente, o amortecimento do sistema é desconhecido. Para determiná-lo é utilizado o procedimento detalhado a seguir.

Primeiro o protótipo é totalmente preenchido com água. Em seguida o protótipo é acionado na freqüência de ressonância através do gerador de função INOVEO FG1000.

O deslocamento do atuador piezelétrico é medido experimentalmente com auxílio do aparelho MTI-2100 Fotonic da MTI Instruments (figura 4.5). O deslocamento obtido para excitação em 45 Hz e 320 Vpp é de 36 μm .

Figura 4.5: MTI-2100 Fotonics.

De posse do deslocamento do atuador piezelétrico, o modelo computacional é calibrado através da propriedade amortecimento do substrato de latão de forma que, para a mesma excitação, o modelo acústico gere o mesmo deslocamento.

Através deste procedimento, o valor de $\beta=0,000476$ (equação 2.17) foi determinado para o amortecimento e este valor foi adotado para todos os modelos acústicos.

4.4 Ensaio de Vazão

Conhecendo-se a frequência de ressonância do protótipo, é realizada a medição da vazão gerada pela bomba de fluxo piezelétrica. O método de medição da vazão consiste em associar um tubo de vidro de seção transversal circular, cuja área e comprimento são conhecidos, em série com a saída da bomba de fluxo conforme desenho esquemático da figura 4.6. O protótipo é mantido na horizontal em um reservatório de grandes dimensões para que não haja diferença de pressão na entrada e saída do sistema.

No estudo computacional, o atuador piezelétrico é modelado de forma que a superfície de latão esteja em contato com a água e o lado da cerâmica piezelétrica esteja em contato com o ar. O atuador piezelétrico é modelado desta maneira, pois testes experimentais preliminares indicaram que o atuador tem a vida útil bastante reduzida quando a cerâmica entra em contato com a água. Portanto, para prolongar a vida útil do atuador e garantir a fidelidade entre o modelo experimental e computacional, deve-se atentar para que o nível da água não ultrapasse a altura do protótipo para que a cerâmica piezelétrica do atuador trabalhe fora da água.

Ao ligar o gerador de funções, injeta-se um corante na entrada do protótipo a fim de permitir a visualização do escoamento. Na região de saída o escoamento é laminar e é possível visualizar o corante no interior do tubo de vidro. No centro do tubo a velocidade máxima é calculada através da medição do tempo Δt que o corante leva para atravessar o comprimento conhecido ΔL . Conforme é conhecido da teoria da mecânica dos fluidos (FOX;MCDONALD, 2006), a velocidade média de um escoamento laminar no interior de um tubo circular é calculada pela equação $\bar{V} = V_{\max} / 2$. Conhecendo-se a velocidade média no interior do tubo e a área da seção transversal, é possível calcular a vazão Q para o escoamento laminar.

Figura 4.6: Ensaio de vazão.

4.5 Ensaio de Pressão Estática

Para avaliar a pressão estática gerada pela bomba de fluxo piezelétrica de diafragma, o protótipo é fixado na horizontal. Assim como no ensaio de vazão, deve-se atentar para que o nível da água não ultrapasse a altura do protótipo para que o atuador piezelétrico trabalhe fora da água. É fixado na saída da bomba de fluxo um duto em “L”, como ilustrado na figura 4.7. Ao excitar o atuador piezelétrico, é possível medir a coluna de água “H” que se forma no duto de saída e, portanto, obter a pressão estática em mmca.

Figura 4.7: Ensaio de pressão.

5 RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os modelos computacionais, os parâmetros utilizados e os resultados obtidos nas simulações computacionais. Além disso, são descritos, de forma comparativa, os resultados experimentais obtidos.

5.1 Modelo Computacional do Atuador Piezelétrico no Ar

No desenvolvimento da bomba de fluxo de diafragma, a primeira etapa a ser realizada é a modelagem computacional de um atuador piezelétrico. O modelo computacional deve permitir calcular as frequências de ressonância e modos de vibrar próximos ao atuador piezelétrico real.

Tabela 5.1: Propriedades dos materiais utilizados nos modelos.

Água	Densidade	ρ_{H_2O}	998	Kg/m^3
	Viscosidade dinâmica	μ	0,001003	$Pa.s$
	Veloc. de propagação da onda acústica	v_s	1500	m/s
Latão	Coefficiente de Poisson	ν	0,34	
	Módulo de elasticidade	E	97	GPa
	Densidade	$\rho_{latão}$	8530	Kg/m^3
PZT-5A	Constantes dielétricas relativas	$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$	916	
		$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	830	
	Constantes elásticas	c_{11}^E	12,10	$\times 10^{10} N.m^{-2}$
		c_{12}^E	7,54	$\times 10^{10} N.m^{-2}$
		c_{13}^E	7,52	$\times 10^{10} N.m^{-2}$
		c_{33}^E	11,10	$\times 10^{10} N.m^{-2}$
		c_{44}^E	2,11	$\times 10^{10} N.m^{-2}$
		e_{31}	-5,35	$C.m^{-2}$
	Constantes piezelétricas	e_{33}	15,8	$C.m^{-2}$
		e_{15}	12,3	$C.m^{-2}$
	Densidade	ρ_{PZT}	7750	Kg/m^3

Inicialmente, é analisado o comportamento do modelo computacional no ar e, portanto, não é necessário modelar o ambiente ao redor do atuador piezelétrico. Isto se deve ao fato de que a influência do meio ar sobre o atuador é desprezível (ANSYS, INC., 2007). Isso se traduz em modelos computacionais com um número reduzido de elementos e, por consequência, um menor custo computacional.

A simulação computacional do atuador piezelétrico em meio ar envolve dois campos acoplados: elétrico e estrutural. Para tanto, é utilizado o elemento tridimensional SOLID98 para a modelagem. Os materiais empregados neste modelo são latão e PZT-5A. As propriedades desses materiais estão listadas na tabela 5.1. As dimensões do modelo do atuador piezelétrico podem ser vistas na figura 5.1.

Figura 5.1: Desenho esquemático do modelo do atuador piezelétrico.

A malha com 31.390 elementos do atuador piezelétrico em meio ar pode ser vista na figura 5.2. As cores indicam os diferentes materiais utilizados e também é possível ver as condições de contorno aplicadas no modelo. As condições de contorno para esta malha são: engaste x, y, z na borda do atuador e tensão e aterramento nos nós dos eletrodos da cerâmica.

Após definir o modelo, é realizada uma análise harmônica com o objetivo de se obter a curva de impedância elétrica e as frequências de ressonância do atuador piezelétrico.

Figura 5.2: Malha de elementos do modelo do atuador piezelétrico.

A curva de impedância elétrica do atuador em meio ar é plotada em função da frequência do sinal elétrico de excitação aplicado ao atuador (320 V_{pp}).

Na figura 5.3, podem-se ver a curva de impedância elétrica e deslocamento em função da frequência para 1º e 2º modos simétricos de vibrar obtidas computacionalmente. Podem-se ver os pontos de ressonância e anti-ressonância, em 1590 Hz e 1650 Hz, respectivamente, para o 1º modo de vibrar, e em 2830 Hz e 2940 Hz, respectivamente, para o 2º modo de vibrar.

Figura 5.3: Curvas de impedância elétrica e deslocamento em função da frequência para os 1º e 2º modos em meio ar.

Através do impedômetro, é possível validar as curvas obtidas computacionalmente. As curvas obtidas experimentalmente se encontram na figura 5.3. Podem-se ver os pontos de ressonância e anti-ressonância, em 1545 Hz e 1617 Hz, respectivamente, para o 1º modo de vibrar, e em 2751 Hz e 2861 Hz, respectivamente, para o 2º modo de vibrar.

No caso de atuadores piezelétricos circulares, os modos de vibrar simétricos são dominantes quando a excitação é elétrica [HONG et al., 2006]. Os modos anti-simétricos aparecem somente quando a excitação é mecânica. Os modos de vibrar do primeiro e segundo modo, com o atuador em meio ar, podem ser vistos na figura 5.4.

Figura 5.4: Modos de vibrar do atuador piezelétrico no ar: (a) 1º modo e (b) 2º modo.

5.2 Análises de Sensibilidade

Como descrito anteriormente, na seção 3.1, esta etapa consiste em realizar análises de sensibilidade a partir de simulações harmônicas com o intuito de se estudar a influência dos parâmetros construtivos e de montagem da bomba de fluxo de diafragma e seus impactos no desempenho do atuador piezelétrico da bomba de fluxo de diafragma. Para esta etapa, são feitas análises em torno do comprimento dos bocais de entrada e saída da bomba de fluxo, do diâmetro das válvulas, da altura da câmara e da excentricidade na montagem do atuador piezelétrico.

Para todas as análises de sensibilidade realizadas nesta etapa, a água foi considerada como meio fluido. As propriedades da água adotadas nas simulações se encontram na tabela 5.1. A simulação computacional da bomba de fluxo piezelétrica em meio aquático envolve três campos acoplados (estrutural, elétrico e fluídico). Pode-se utilizar os elementos tridimensionais SOLID98 na modelagem das partes

estruturais e o elemento FLUID30 na modelagem do fluido. No modelo acústico da bomba de fluxo piezelétrica é necessário modelar uma camada de elementos FLUID30 com estrutura na região de interface entre o fluido e a estrutura, para que a condição de contorno FSI (*Fluid Solid Interface*) seja aplicada.

Todas as análises de sensibilidade desta etapa partem de um modelo computacional base, através do qual os parâmetros estudados são variados. A figura 5.5 ilustra o desenho esquemático do modelo acústico adotado. A figura 5.6 mostra a malha de elementos com aproximadamente 110.000 elementos deste modelo acústico. Para este modelo, as condições de contorno são: contorno fixo na câmara, válvulas e tubo, tensão e terra nos eletrodos do atuador, pressão zero na entrada e saída da bomba de fluxo e simetria longitudinal.

Figura 5.5: Desenho esquemático do modelo acústico base adotado.

Figura 5.6: Malha de elementos do modelo acústico base adotado.

5.2.1 Comprimento dos Bocais de Entrada e Saída da Bomba de Fluxo

Para este caso, varia-se o comprimento dos bocais de entrada e saída, c_{bocal} , (ver figura 5.5) para se verificar a influência no comportamento do atuador. Após a realização das análises harmônicas, as frequências de ressonância e amplitude de movimento para o 1º modo são extraídas. Ao final é feita uma análise quantitativa dos resultados a fim de se estudar a influência deste parâmetro na bomba de fluxo em

questão. Foram feitas análises para os comprimentos dos bocais iguais a 5 mm, 20 mm, 50 mm e 80 mm. Na figura 5.7, pode-se observar os resultados obtidos computacionalmente.

Figura 5.7: Gráficos de impedância elétrica e amplitude de oscilação para diferentes valores de c_{bocal} .

A tabela 5.2 abaixo resume os resultados obtidos.

Tabela 5.2: Resultados da análise de sensibilidade C_{bocal} .

C_{bocal} (mm)	Frequência de Ressonância – 1º modo (Hz)	Amplitude de máxima pico-a-pico (μm)
5,0	44,80	36
20,0	45,25	35
50,0	45,75	34,42
80,0	46,25	33,79

De acordo com os resultados, o comprimento dos bocais não influencia de forma significativa na frequência de ressonância e amplitude de movimento do atuador.

5.2.2 Diâmetro das Válvulas

Esta análise de sensibilidade tem por objetivo, investigar se os diâmetros das válvulas (D_{maior} e D_{menor}) influenciam no comportamento do atuador. Para tanto, são feitas simulações harmônicas com dois modelos acústicos: uma com e outra sem a presença das válvulas. Na figura 5.8 é mostrado a malha de elementos 3D, com aproximadamente 110.000 elementos e 50.000 nós, desses dois modelos propostos. Para esses modelos, as condições de contorno são: contorno fixo na câmara, válvulas e tubo, tensão elétrica e terra nos eletrodos do atuador, pressão zero na entrada e saída da bomba de fluxo e simetria longitudinal.

Figura 5.8: Malha de elementos 3D para os modelos propostos para o estudo do diâmetro de válvulas: (a) com válvulas e (b) sem válvulas.

Como resultado, obtêm-se as seguintes curvas de impedância elétrica e amplitude de movimento para os dois casos propostos.

Figura 5.9: Gráfico Impedância x Frequência e Amplitude x Frequência para estudo do diâmetro de válvulas.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que as frequências de ressonância e amplitude de movimento permaneceram muito próximas para os dois casos analisados.

5.2.3 Altura da Câmara

Esta análise de sensibilidade envolve o estudo da influência da altura da câmara (h) no atuador piezelétrico. Varia-se a altura da câmara do modelo acústico de 8 a 17 mm com incrementos de 1 mm. Para cada altura é realizada uma análise harmônica para se obter a frequência de ressonância e a amplitude de movimento no primeiro modo. O resultado pode ser resumido pelos gráficos a seguir.

Figura 5.10: Resultados da análise de sensibilidade em torno da altura da câmara.

Nota-se que a altura do canal é um parâmetro que influencia pouco no comportamento do atuador piezelétrico para este modelo de bomba de fluxo, principalmente pelo fato da amplitude de movimento do atuador ser muito menor que a altura do canal.

5.2.4 Excentricidade do Atuador Piezelétrico

Esta análise de sensibilidade consiste em verificar se a excentricidade do atuador piezelétrico na montagem da bomba de fluxo altera de forma significativa o comportamento do atuador piezelétrico, e por consequência, o desempenho da bomba de fluxo. Esta etapa é motivada porque muito dos atuadores piezelétricos apresentam desvios na colagem da cerâmica piezelétrica no substrato de latão. A figura abaixo ilustra o desvio de excentricidade.

Figura 5.11: Desvio excêntrico no atuador piezelétrico.

Para a realização desta análise de sensibilidade o parâmetro “e” (ver figura 5.11) varia de 0,0 a 2,0 mm com incremento de 0,5 mm. Para cada valor de “e” é feita a simulação harmônica para se obter a frequência de ressonância e a amplitude de movimento do atuador. O resultado pode ser representado pela figura 5.12.

Nota-se que a frequência de ressonância altera de forma significativa com a variação da excentricidade, ou seja, o parâmetro de excentricidade é crítico no desempenho da bomba de fluxo piezelétrica de diafragma.

Figura 5.12: Resultados da análise de sensibilidade em torno da excentricidade do atuador piezelétrico.

5.3 Análises de Sensibilidade Baseada nas Simulações de Escoamento de Fluido

Concluída a etapa anterior, são feitas análises de sensibilidade em torno dos parâmetros geométricos das válvulas, baseada na simulação de escoamento de fluido. Os parâmetros das válvulas estudados podem ser vistos na figura abaixo.

Figura 5.13: Desenho esquemático do parâmetros das válvulas estudado.

Para esta análise de sensibilidade varia-se o diâmetro maior, D_{maior} , de 1,9 mm a 2,1 mm com incrementos de 0,1 mm. Varre-se o diâmetro menor, D_{menor} , de 0,7 mm a 0,8 mm com incrementos de 0,1 mm. O parâmetro comprimento, $C_{\text{válvula}}$, varia de 6 a 8 mm com incremento de 1 mm.

A simulação de escoamento de fluido tem como objetivo, observar o comportamento do sistema, determinando um valor médio para a vazão após o sistema entrar em regime estacionário. Portanto, nesta etapa, para cada parâmetro alterado, realiza-se uma simulação de escoamento de fluido a fim de se obter a vazão média como resposta.

Para esta etapa, foi considerado um modelo simplificado da bomba de fluxo de diafragma, a fim de reduzir o custo computacional. Deve-se ressaltar que o objetivo desta etapa é a análise paramétrica das válvulas da bomba de fluxo. A figura 5.14 mostra o modelo simplificado. Note que o modelo simplificado possui a câmara em formato cúbico. A malha de volumes finitos também pode ser vista na figura 5.14.

Figura 5.14: Malha de volumes finitos do modelo simplificado com 26.756 volumes e 8.761 nós e as condições de contorno.

Na figura 5.14, observa-se a representação das condições de contorno na região de entrada impostas pelo problema da bomba de fluxo piezelétrica. Nos nós da entrada e da saída da bomba de fluxo são prescritas pressões relativas nulas, ou seja, todo o interior da bomba de fluxo está submerso no meio fluido e a direção do escoamento se dá na direção horizontal. Nos nós das paredes laterais, da parede inferior da câmara e das paredes das válvulas são impostos deslocamentos e velocidades nulas. Para este modelo simplificado, impõe-se uma pressão p na parede superior da câmara como forma de emular o atuador piezelétrico. A pressão imposta é da forma:

$$p = A \sin(2\pi ft) \quad (5.1)$$

onde: p = pressão imposta; A = amplitude; f = frequência; t = tempo

Os parâmetros A e f são estimados em 60 μm e 45 Hz, respectivamente, pois deseja-se realizar uma análise qualitativa dos resultados obtidos para cada parâmetro alterado.

Após definir as condições de contorno, são definidas as propriedades dos volumes finitos. Para a simulação da bomba de fluxo, precisa-se definir a densidade e a viscosidade do fluido. A condutividade térmica e o calor específico não são necessários uma vez que não há interesse no comportamento térmico do sistema. O fluido utilizado foi a água, cujas propriedades estão listadas na tabela 5.1.

Finalmente, para cada parâmetro alterado, é realizada a análise transiente até o instante $t=0,1$ s, pois neste instante, o escoamento já é estacionário. Como resultado, pode-se ver a seguir, os gráficos para $c_{\text{válvula}}=6$ mm, $c_{\text{válvula}}=7$ mm e $c_{\text{válvula}}=8$ mm.

Figura 5.15: Vazão média para $c_{\text{válvula}}=6\text{mm}$.

Figura 5.16: Vazão média para $c_{\text{válvula}}=7\text{mm}$.

Figura 5.17: Vazão média para $c_{v\grave{a}lvula}=8\text{mm}$.

A maior vazão média ocorre para $D_{maior}=1,9\text{mm}$, $D_{menor}=0,9\text{mm}$ e $c_{v\grave{a}lvula}=8\text{mm}$. Estes parâmetros são adotados para a modelagem completa final da bomba de fluxo de diafragma que será descrita adiante.

5.4 Modelo Computacional de Escoamento de Fluido Completo Final da Bomba de Fluxo de Diafragma

A partir dos resultados obtidos nas etapas anteriores, pode-se realizar a modelagem completa da bomba de fluxo de diafragma. A modelagem em questão é mais detalhada que a modelagem feita na etapa anterior. Para este modelo são compilados todos os resultados obtidos a partir da etapa de análises de sensibilidade. Além disso, ao contrário do modelo anterior simplificado, o atuador piezelétrico também é modelado. O desenho esquemático do modelo pode ser visto na figura 5.18.

Figura 5.18: Desenho esquemático do modelo completo final.

Como no caso anterior, pressões relativas nulas são impostas na entrada e na saída da bomba de fluxo. Além disso, novamente, são impostos deslocamentos e velocidades nulas nas paredes das válvulas, parede lateral e inferior da câmara. Nos nós do atuador piezelétrico (parede superior da câmara) são impostos deslocamentos e velocidades. Os deslocamentos e as velocidades dos nós são obtidos através da curva de deformação do atuador piezelétrico, imerso em água, quando excitado no primeiro modo de vibrar, extraído de uma análise harmônica prévia. Ou seja, a partir da análise harmônica prévia, se obtém uma equação polinomial que represente a forma do primeiro modo de vibrar do atuador piezelétrico. Quando multiplicamos este polinômio por $\sin(\omega t)$, onde ω é a velocidade angular e t é o tempo, obtemos uma representação do movimento oscilatório do atuador piezelétrico ao longo do tempo. Derivando essa equação, obtém-se a equação da velocidade do atuador. Com essas duas equações (deslocamento e velocidade) pode-se prescrever o comportamento do atuador piezelétrico na simulação de escoamento de fluido em questão, de modo aproximado. Essa aproximação elimina a necessidade de simular um sistema completo considerando os efeitos piezelétricos e de escoamento de fluido do sistema, o que geraria um alto custo computacional. A figura 5.19 ilustra a malha de volumes finitos e as condições de contorno impostas.

Figura 5.19: Malha do modelo completo com 42.873 volumes e 9.333 nós.

O próximo passo é definir as propriedades dos volumes. Deve-se definir a viscosidade e a densidade do fluido, no caso, a água.

Por fim, especifica-se as faces do atuador como fronteira móvel (formulação ALE) para que a malha seja rearranjada a cada iteração, adequando-se às condições impostas.

Figura 5.20: Vetores de velocidade na fase de sucção.

As figuras 5.20 e 5.21 mostram os vetores de velocidade do escoamento ao longo da bomba de fluxo nos instantes de sucção e descarga. Pode-se notar que na fase de sucção há maior transporte de fluido na entrada da bomba de fluxo. E na fase de descarga, ocorre maior transporte de fluido na saída da bomba de fluxo.

Figura 5.21: Vetores de velocidade na fase de descarga.

As figuras 5.22 e 5.23 mostram os campos de pressões ao longo da bomba de fluxo nos instantes de sucção e descarga.

Figura 5.22: Campo de pressões na fase de sucção.

Figura 5.23: Campo de pressões na fase de descarga.

Na figura 5.24 e 5.25, têm-se as curvas de vazão e pressão obtidas computacionalmente para excitação em 320 V_{pp} e 45 Hz. A partir das curvas de vazão e pressão é possível calcular a vazão média e a pressão média. Lembrando que nesse tipo de bomba de fluxo de diafragma, o transporte de fluido ocorre em ambos os sentidos. A vazão média obtida é de 22,5 ml/min e a pressão média obtida é de 95 mmca.

Figura 5.24: Curva de vazão do modelo completo.

Figura 5.25: Curva de pressão do modelo completo.

5.5 Curvas Características da Bomba de Fluxo de Diafragma

A partir do modelo final da bomba de fluxo, descrito na seção anterior, é possível obter computacionalmente as curvas características da bomba de fluxo.

5.5.1 Curvas de Vazão x Frequência

Para avaliar a influência da frequência de excitação do atuador piezelétrico na vazão gerada pela bomba de fluxo é levantada a curva de vazão média em função da frequência, mostrada na figura 5.26. Deste gráfico é possível observar que a vazão é máxima quando o atuador vibra na frequência de ressonância de 45 Hz.

Figura 5.26: Gráfico de vazão em função da frequência para excitação em 320 Vpp.

Para validar esse resultado computacional, são realizados ensaios experimentais, variando-se a frequência e medindo-se a vazão gerada. O método de medição de vazão é descrito na seção 4.4. A curva de vazão em função da frequência é obtida (ver figura 5.26), mantendo-se a excitação em 320 V_{pp}. A figura 5.27 apresenta a sequência deste teste experimental, onde pode ser visto o escoamento na saída do protótipo. Da figura 5.26 é possível identificar a vazão máxima experimental em aproximadamente 23 ml/min quando o protótipo é acionado em 45

Hz. Essa figura também mostra que há um intervalo de frequência no qual é possível obter diferentes vazões apenas variando-se a frequência de excitação do atuador piezelétrico.

Figura 5.27: Seqüência do teste de vazão.

5.5.2 Curvas de Pressão x Frequência

O próximo passo é a obtenção das curvas de pressão em função da frequência. A figura 5.28 mostra o gráfico da pressão média em função da frequência, obtida computacionalmente, onde pode ser vista a pressão máxima de 95 mmca para a frequência de 45 Hz.

Também são realizados ensaios de pressão, descritos na seção 4.5, utilizando o mesmo protótipo fabricado. Ao acionar o atuador piezelétrico, é possível medir a coluna de água que se forma no duto de saída. A figura 5.29 exibe uma seqüência de um dos testes realizados com o protótipo. O teste de pressão é repetido para diversos valores de frequência, sempre em 320 V_{pp}. O gráfico da figura 5.28 apresenta a distribuição de pressão, obtida experimentalmente, em função da frequência de excitação do atuador piezelétrico, onde é possível ver a pressão máxima gerada de 93 mmca quando o protótipo é acionado a 45 Hz.

Figura 5.28: Gráfico de pressão em função da frequência para excitação em 320 Vpp.

Figura 5.29: Sequência do teste de pressão.

O gráfico da figura 5.28 mostra que há um intervalo de frequências de excitação com a qual é possível variar a pressão linearmente com a frequência. Portanto, a frequência de excitação também pode ser utilizada para controlar a pressão neste tipo de bomba de fluxo.

5.5.3 Curvas de Pressão x Vazão

Impondo-se diferentes pressões não nulas como condição de contorno na saída do modelo da bomba de fluxo de diafragma, é possível obter computacionalmente a curva de pressão em função da vazão que se encontra a seguir.

Figura 5.30: Gráfico de pressão em função da vazão para o atuador excitado em 45 Hz e 320 Vpp.

São realizados ensaios experimentais com o objetivo de validar a curva de pressão em função da vazão obtida computacionalmente. O ensaio consiste de uma pequena variação do ensaio de pressão descrito na seção 4.5. Neste ensaio, o duto em “L” é cortado em alturas pré-determinadas e a cada mudança de altura, é medida a vazão. A vazão é medida coletando-se a água que sai do duto com um recipiente por um intervalo tempo conhecido. Conhecendo-se o volume de líquido coletado e

sabendo-se o intervalo de tempo, é possível calcular a vazão média. Neste ensaio, o atuador é excitado em 45 Hz e 320 Vpp. Com este procedimento é possível plotar a curva experimental da figura 5.30 e comparar os resultados obtidos computacionalmente e experimentalmente. O gráfico da figura 5.30 mostra que quando a coluna d'água é de 93 mm, a vazão é nula. Diminuindo-se a coluna d'água, a vazão aumenta até atingir 23 ml/min, vazão para a qual a coluna d'água é nula. Esse comportamento é típico de bombas de fluxo classificadas como dinâmicas.

5.5.4 Curvas de Vazão x Voltagem

A próxima curva, obtida computacionalmente, é a curva de vazão em função da voltagem pico a pico aplicada. Para tanto, varia-se a voltagem pico a pico aplicada no atuador piezelétrico, mantendo-se a excitação no primeiro modo ressonante de 45 Hz. A curva computacional pode ser vista na figura 5.31. O resultado do ensaio experimental que valida a curva computacional obtida se encontra também na figura 5.31. Para esse ensaio, a voltagem pico a pico máxima aplicada é de 340 V, pois a partir deste ponto, há a queima do eletrodo da cerâmica piezelétrica. Pode-se notar que não é interessante utilizar a voltagem como parâmetro de controle da vazão devido a não-linearidade da curva de vazão em função da voltagem.

Figura 5.31: Curva de vazão em função da voltagem para excitação em 45 Hz.

5.5.5 Curvas de Pressão x Voltagem

A próxima curva, obtida computacionalmente, é a curva pressão em função da voltagem pico a pico aplicada. Da mesma forma que na seção anterior, varia-se a voltagem pico a pico aplicada no atuador piezelétrico, mantendo-se a excitação no primeiro modo ressonante de 45 Hz. A curva computacional obtida e o resultado do ensaio experimental que valida essa curva computacional são representadas na figura 5.32. Como no ensaio anterior, a voltagem pico a pico máxima aplicada é de 340 V, pois a partir desse ponto, há a queima do eletrodo da cerâmica piezelétrica.

Figura 5.32: Curva de pressão em função da voltagem para excitação em 45 Hz.

Como no caso anterior, o gráfico da figura 5.32 mostra que não é interessante utilizar a voltagem como parâmetro de controle da pressão devido a não-linearidade da curva de pressão em função da voltagem. Portanto, para a bomba de fluxo em estudo, o parâmetro mais indicado para o controle da vazão e da pressão é a frequência.

Os ensaios apresentados neste capítulo mostram a concordância entre os resultados computacionais e experimentais, validando o procedimento computacional adotado.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo o estudo da metodologia de desenvolvimento de uma bomba de fluxo piezelétrica de diafragma de baixo custo do tipo “valve-less” utilizando a modelagem por Método dos Elementos Finitos (MEF) e a construção e caracterização de protótipos.

A utilização da simulação computacional mostrou-se bastante importante no desenvolvimento da bomba de fluxo piezelétrica de diafragma, pois permite realizar análises de sensibilidade que direcionam a escolha dos parâmetros geométricos do dispositivo de forma ágil, rápida e econômica.

Outra conclusão importante, resultado das análises de sensibilidade acústica, é a influência do parâmetro “e” no desempenho da bomba de fluxo de diafragma. Portanto, deve-se realizar a montagem de forma a obter concentricidade do atuador piezelétrico em relação à câmara da bomba de fluxo piezelétrica, caso contrário, há uma queda acentuada na amplitude de movimento do atuador piezelétrico. Por outro lado, o estudo do comprimento dos bocais, do diâmetro das válvulas e da altura da câmara mostrou que estes parâmetros não afetam, de forma significativa, o desempenho da bomba de fluxo em questão.

Através das análises de sensibilidade baseada nas simulações de escoamento de fluido, foi possível obter a geometria das válvulas que gera a maior vazão média. Estes parâmetros são adotados no modelo fluídico completo final da bomba de fluxo de diafragma.

Foi possível através das simulações de escoamento de fluido do modelo fluídico completo final da bomba de fluxo extrair computacionalmente as curvas características da bomba de fluxo. A fabricação de protótipos também se mostrou importante como complemento das simulações computacionais, permitindo a verificação dos resultados obtidos computacionalmente. Os resultados experimentais apresentados neste trabalho mostram concordância com os resultados computacionais, validando o procedimento computacional utilizado.

Por fim, foi possível desenvolver de forma bastante satisfatória uma bomba de fluxo piezelétrica de diafragma “valve-less”, utilizando metodologia, materiais e processos de fabricação de baixo custo. O protótipo final possui um bom desempenho e atende a expectativa inicial de apresentar elevada pressão de trabalho se comparado a outros princípios de bombeamento empregados na área de Microfluídica.

7 TRABALHOS FUTUROS

O autor deste trabalho de mestrado deixa como sugestão de trabalhos futuros o estudo de viabilidade de bombas de fluxo piezelétricas de diafragma “valve-less” utilizando mais de um atuador (figura 7.1) e o estudo de viabilidade de uma configuração em série da bomba de fluxo piezelétrica de diafragma “valve-less” (figura 7.2).

Figura 7.1: Desenho esquemático da bomba de fluxo piezelétrica de diafragma de dois atuadores.

Figura 7.2: Desenho esquemático da configuração em série da bomba de fluxo piezelétrica de diafragma “valve-less”.

8 REFERÊNCIAS

ANSYS, INC. Release 11.0 Documentation for ANSYS, 2007.

ANDRADE, A. J. P.; BISCEGLI, J.; DINKHUYSEN, J.; SOUSA, J. E.; OHASHI, Y.; HEMMINGS, S.; GLUECK, J.; KAWAHITO, K.; NOSE, Y. Characteristics of a blood pump combining the centrifugal and axial pumping principles: The spiral pump. *Artificial Organs*, 20, p. 605–612, 1996.

BALIGA, B. R.; PATANKAR, S. V. A control-volume finite-element method for two-dimensional fluid flow and heat transfer. *Numerical Heat Transfer*, v. 6, p. 245-261, 1983.

BALIGA, B. R.; PATANKAR, S. V. A new finite-element formulation for convection-diffusion problems. *Numerical Heat Transfer*, v. 3, p. 393-409, 1980.

BAR-COHEN, Y.; CHANG, Z. Piezoelectrically actuated miniature peristaltic pump. In: *Proceedings of SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, p. 425–432., 2001.

BU, M.; MELVIN, T.; ENSELL, G.; WILKINSON, J.; EVANS, A. Design and theoretical evaluation of novel microfluidic device to be used for PCR. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, n. 13, p. 125-130, 2003.

BURGEE, G. W.; ANTAKI, J. F.; WU, Z. J.; HOLMES, A. J. Computational fluid dynamics as a development tool for rotary blood pumps. *Artificial Organs*, v. 25, p. 336–340, 2001.

CARROZZA, M. C.; CROCE, N.; MAGNANI, B.; DARIO, P. A piezoelectric-driven stereolithography-fabricated micropump. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, n. 5, p. 177–179, 1995.

DONEA, J.; HUERTA, A.; PONTOT, J. P.; RODRÍGUEZ-FERRAN, A. Arbitrary Lagrangian-Eulerian Methods. John Wiley & Sons Ltd., 2004.

ESASHI, M.; SHOJI, S.; NAKANO, A. Normally closed microvalve and micropump fabricated on a silicon wafer. *Sens. Actuators*, n. 20, p. 163–169, 1989.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. LTC, 2006.

GARIMELLA, S. V.; SINGHAL, V.; LIU, D. On-chip thermal management with microchannel heat sinks and integrated micropumps. In: *Proceedings Of The IEEE*, v. 94, p. 1534–1548, 2006.

GULICH, J. F. Impact of three-dimensional phenomena on the design of rotodynamic pumps. In: *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part-C Journal of Mechanical Engineering Science*, v. 213, p. 59–70, 1999.

HONG, E.; TROLIER-MCKINSTRY, S.; SMITH, R.; KRISHNASWAMY, S. V.; FREIDHOFF, C. Vibration of Micromachined Circular Piezoelectric Diaphragms. *IEEE Transactions On Ultrasonics Ferroelectrics And Frequency Control*, v. 53, n. 4, p. 697–706, 2006.

IKEDA, T. *Fundamentals of Piezoelectricity*. Oxford, Inglaterra: Oxford University Press, 1996.

LASER, D. J.; SANTIAGO, J. G. A review of micropumps. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, v. 14, n. 6, p. R35–R64, 2004.

LERCH, R. Simulation of piezoelectric devices by 2-dimensional and 3-dimensional finite-elements. *IEEE Transactions On Ultrasonics Ferroelectrics And Frequency Control*, v. 37, n. 3, p. 233–247, 1990.

MALISKA, C. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. Segunda Edição. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Rio de Janeiro, 2004.

MIYAZAKI, S.; KAWAI, T.; ARARAGI, M. A piezo-electric pump driven by a flexural progressive wave. In: *IEEE-MEMS Workshop, Nara, Anais*, p. 283–288, Japan, 1991.

NADER, G. Desenvolvimento de Técnicas de Caracterização de Transdutores Piezelétricos. *Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, 2002.

- NAKASONE, P.; PIRES, R.; LIMA, C.; SILVA, E. Computational simulation and experimental characterization of a piezoelectric pump. In: *Proceedings of XXVI CILAMCE 2005 (Iberian Latin America Congress on Computational Methods in Engineering)*. Guarapari, ES, 2005.
- NÓBREGA, E. G. O.; CAMPOS, C. D. M. Deep UV Lithography Valveless Micropump Design and Test. In: *Proceedings of the 18th Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2005)*, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, 2005.
- OLSSON, A.; STEMME, G.; STEMME, E. A numerical design study of the valveless diffuser pump using a lumped-mass model. *IOP Publishing*, p. 34-44, 1998.
- OSTERGAARD, D. F.; PAWLAK, T. P. 3-dimensional finite-elements for analyzing piezoelectric structures. *IEEE Transactions On Ultrasonics Ferroelectrics And Frequency Control*, v. 34, n. 3, p. 421–421, 1987.
- SINGHAL, V.; GARIMELLA, S. V.; RAMAN, A. Microscale pumping technologies for microchannel cooling systems. *Applied Mechanics Reviews*, 57, p. 191–221, 2004.
- STEMME, E.; LARSSON S. G.; The piezoelectric capillary injector-a new hydrodynamic method for dot pattern generation. *IEEE Transaction on Electron devices*, v. 20, n. 1, p. 14-19, 1973.
- STEMME, E.; STEMME, G. A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump. *Sensors and Actuators A-Physical*, n. 39, pp. 159–167, 1993.
- TEYMOORI, M. M.; Abbaspour-Sani, E. Design and simulation of a novel electrostatic peristaltic micro-machined pump for drug delivery applications. *Sensors and Actuators A-Physical*, 117, p. 222–229, 2005.
- TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER, S.; *Theory of Plates and Shells, second edition*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1959.

ULLMANN, A.; The piezoelectric valveless pump-performance enhancement analysis. *Sensors and Actuators A*, n. 69 ,p.97-105, 1998.

ULLMANN, A.; FONO, I.; TAITEL, Y. A piezoelectric valve-less pump-dynamic model. *Journal of Fluids Engineering - Transactions of the ASME*, n. 123, pp. 92–98, 2001.

VAN LINTEL, H. T. G.; VAN DE POL, F. C. M.; BOUWSTRA, S. A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon. *Sens. Actuators*, n. 15, p. 153–167, 1988.

VOORDE, J. V.; VIERENDEELS, J.; DICK, E. Flow simulations in rotary volumetric pumps and compressors with the fictitious domain method. *Journal of Computational And Applied Mathematics*, v. 168, p. 491–499, 2004.

WU, T.; RO, P. I.; KINGON, A. I.; MULLING, J. F. Piezoelectric resonating structures for microelectronic cooling. *Smart Materials & Structures*, Iop Publishing Ltd, v. 12, n. 2, p. 181–187, 2003.

ZHANG, T. Valveless piezoelectric Micropump for fuel delivery in direct methanol fuel cell (DMFC) devices. *Dissertação (Doutorado) – University Pittsburgh*, Pittsburgh, 2005.

ZENGERLE, R.; KLUGE, S.; RICHTER, M.; RICHTER, A. A bidirectional silicon micropump. In: *Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, p. 19–24, 1995.

APÊNDICE A: PROGRAMAS EM APDL

- Modelo do atuador piezelétrico no ar

```

=====
! Parâmetros da simulação
=====
MODELO = 'Atuador_Ar'
/FILNAME,%MODELO%
/NOPT
/CONFIG,NPROC,2
/PREP7
/triad,off

=====
! DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS
=====
! METAL
!-----
ET,1,SOLID98,2,,,,0

! MATERIAL PZT
!-----
ET,2,SOLID98,3,,,,0

=====
! PROPRIEDADES DOS MATERIAIS
=====
! Cobre - Material 1
!-----
UIMP,1,EX, , ,11e10,
UIMP,1,DENS, , ,8970,
UIMP,1,PRXY, , ,0.34,
MP,DAMP,1,3e-9

! PZT-5A grupo de simetria 6 mm
!-----
! Piezo constants
!-----
e31=-5.4
e33=15.8
e15=12.3
TB,PIEZ,2
TBDATA,1,0,e31,0
TBDATA,4,0,e33,0
TBDATA,7,0,e31,0
TBDATA,10,e15,0,0
TBDATA,13,0,0,e15

!*      PZT-5A - classe de simetria 6mm
!* | 0 -5.4 0 | | 0 e31 0 |
!* | 0 15.8 0 | | 0 e33 0 |
!* | 0 -5.4 0 | | 0 e31 0 |
!* | 12.3 0 0 | = | e15 0 0 |
!* | 0 0 12.3 | | 0 0 e15 |
!* | 0 0 0 | | 0 0 0 |

! Elastic constants at E cst
!-----
c11=12.5E10
c12=7.54E10
c13=7.52E10
c33=11.1E10
c44=2.11E10
c66=.5*(c11-c12)
TB,ANEL,2
TBDATA,1,c11,c13,c12,0,0,0
TBDATA,7,c33,c13,0,0,0
TBDATA,12,c11,0,0,0
TBDATA,16,c44,0,0
TBDATA,19,c44,0
TBDATA,21,c66

!*      PZT-5A - classe de simetria 6mm (*10^10)
!* | 12.5 7.52 7.54 0 0 0 | | c11 c13 c12 0 0 0 |
!* | 11.1 7.52 0 0 0 0 | | c33 c13 0 0 0 |
!* | 12.5 0 0 0 0 0 | | c11 0 0 0 0 |
!* | 2.11 0 0 0 0 0 | | c44 0 0 0 |
!* | 2.11 0 0 0 0 0 | | c44 0 0 |
!* | 2.26 | | c66 |

! Constantes dieletricas a strain (S) constante
!-----
e00=8.85E-12
eps1=916*8.85E-12
eps3=830*8.85E-12
MP,PERX,2,eps1
MP,PERY,2,eps3
MP,PERZ,2,eps1

!*      PZT-5A - classe de simetria 6mm (*10^-9)
!* | 8.1066 0 0 0 | | eps11 0 0 |
!* | 0 7.3455 0 0 | = | 0 eps33 0 |
!* | 0 0 8.1066 0 0 | | 0 0 eps11 |

! Densidade e amortecimento
!-----
MP,DENS,2,7650
QM=75
FR=47000
OMEGA=2*3.1416*FR
BETA=1/(OMEGA*QM)
MP,DAMP,2,BETA

! Meio fluídico: Agua
!-----
!UIMP,3,DENS, , ,998,
!UIMP,3, MU, , ,1.0,
!UIMP,3,SONC, , ,1500,

UIMP,3,DENS, , ,1,

```

```

UIMP,3, MU, , ,1.0,
UIMP,3,SONC, , ,340,

!=====
! PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO (OBS: dimensões no S.I.)
!=====
FreqInicial = 10          ! Frequencia inicial da analise harmonica
FreqFinal   = 10          ! Frequencia final da analise harmonica
FreqPassos  = 1           ! Número de substeps da analise harmonica
tensao      = 160         ! Voltagem aplicada nos PZTs
Ecobre      = 0.00013     ! Espessura do cobre
Epzt        = 0.00025     ! Diâmetro do disco de PZT
Hcam        = 0.005       ! Altura da câmara
Dcam        = 0.030       ! Diâmetro da câmara
Lcondut     = 0.005       ! Comprimento do condutor da câmara para as válvulas
Dtubo       = 0.0023      ! Diâmetro dos bocais
Ltubo       = 0.005       ! Comprimento dos bocais
Cvalv       = 0.007       ! Comprimento dos cones
Dmaior      = 0.002       ! Diâmetro maior dos cones
Dmenor      = 0.0008      ! Diâmetro menor dos cones
element     = 0.0005      ! Dimensão do elemento

!=====
! Geometria
!=====
CSYS,4
WPROTA,0,-90              ! Utiliza o WorkingPlane (WP) como referência
CYL4,0,0,Dcam/2,,,,Ecobre ! Rotaciona o WP em -90o na direção de X
WPOFFS,0,0,Ecobre         ! Cria o volume do metal
CYL4,0,0,Dpzt/2,,,,Epzt   ! Desloca o WP de Emetal na dir. Z
WPCSYS,-1,0               ! Cria o volume do PZT
                           ! Retorna o WP ao estado original

VGLUE,all
NUMCMP,all

! APLICAÇÃO DOS MATERIAIS E ELEMENTOS
!=====
VSEL,S,,,2                ! Propriedades do metal
VATT,1,,1

VSEL,S,,,1                ! Propriedades dos PZTs
VATT,2,,2
ALLS

!=====
! GERAÇÃO DA MALHA
!=====
ESIZE,element
MSHAPE,1
VMESH,all

!=====
! ACOPLAMENTO DOS NÓS DAS SUPERFÍCIES DOS PZTs
! (união dos nós ligados ao terra)
!=====
ASEL,S,,,4
NSLA,S,1
CP,1,VOLT,all
alls

!=====
! CONDIÇÕES DE CONTORNO
!=====
LSEL,S,LOC,Y,0            ! Contorno 1
NSLL,S,1
D,all,UX,0
D,all,UY,0
D,all,UZ,0
alls

LSEL,S,,,5,8              ! Contorno 2
NSLL,S,1
D,all,UY,0
alls

ASEL,S,,,4,5              ! Voltagem terra
NSLA,S,1
D,all,VOLT,0
alls
FINISH

!=====
! SOLUÇÃO
!=====
/SOLU
!antype, HARMIC
!KBC,1
!HARFRQ, FreqInicial,FreqFinal
!NSUBST, FreqPassos
!solve
!save

ANTYPE,MODAL
MODOPT,LANB,10
SOLVE

```

SAVE

```
=====
! PÓS-PROCESSAMENTO (POST1)
=====
/POST1
```

- Modelo acústico base adotado nas análises de sensibilidade

```

Engaste do metal apenas nas arestas
! Com condição de contorno de pressão nula
! Estudo de convergencia da malha
! Verificacao da influencia das valvulas

!=====
! Parâmetros da simulação
!=====
MODELO = 'Modelo_Base'
/FILNAME,%MODELO%
/NOPR
/CONFIG,NPROC,2
/PREP7
/triad,off

!=====
! DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS
!=====
! METAL
!-----
ET,1,SOLID98,2,,,,,0

! MATERIAL PZT
!-----
ET,2,SOLID98,3,,,,,0

! Material fluido com estrutura
!-----
!* usado como superfície de amortecimento de propagação
!* de ondas acusticas.
ET,3,FLUID30,,0

! Material fluido sem estrutura
!-----
!* meio no qual a onda acustica se propaga.
ET,4,FLUID30,,1

!=====
! PROPRIEDADES DOS MATERIAIS
!=====
! Cobre - Material 1
!-----
UIMP,1,EX, , ,11e10,
UIMP,1,DENS, , ,8970,
UIMP,1,PRXY, , ,0.34,
MP,DAMP,1,3e-9

! PZT-5A grupo de simetria 6 mm
!-----
! Piezo constants
!-----
e31=-5.4
e33=15.8
e15=12.3
TB,PIEZ,2
!* PZT-5A - classe de simetria 6mm
!* | 0 -5.4 0 | | 0 e31 0 |
!* | 0 15.8 0 | | 0 e33 0 |
!* | 0 -5.4 0 | | 0 e31 0 |
!* | 12.3 0 0 | = | e15 0 0 |
!* | 0 0 12.3 | | 0 0 e15 |
!* | 0 0 0 | | 0 0 0 |

! Elastic constants at E cst
!-----
c11=12.5E10
c12=7.54E10
c13=7.52E10
c33=11.1E10
c44=2.11E10
c66=.5*(c11-c12)
TB,ANEL,2
!* PZT-5A - classe de simetria 6mm (*10^10)
!* | 12.5 7.52 7.54 0 0 0 | | c11 c13 c12 0 0 0 |
!* | 11.1 7.52 0 0 0 | | c33 c13 0 0 0 |
!* | 12.5 0 0 0 | | c11 0 0 0 |
!* | 2.11 0 0 | = | c44 0 0 |
!* | 2.11 0 | | c44 0 |
!* | 2.26 | | c66 |

! Constantes dieletricas a strain (S) constante
!-----
e00=8.85E-12
eps1=916*8.85E-12
eps3=830*8.85E-12
!* PZT-5A - classe de simetria 6mm (*10^-9)
!* | 8.1066 0 0 | | eps11 0 0 |
!* | 0 7.3455 0 | = | 0 eps33 0 |
!* | 0 0 8.1066 | | 0 0 eps11 |

```



```

! Densidade e amortecimento
!-----
MP,DENS,2,7650
QM=75
FR=47000
OMEGA=2*3.1416*FR
BETA=1/(OMEGA*QM)
MP,DAMP,2,BETA

! Meio fluídico: Agua
!-----
UIMP,3,DENS, , ,998,
UIMP,3, MU, , ,1.0,
UIMP,3,SONC, , ,1500,

!=====
! PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO (OBS: dimensões no S.I.)
!=====
FreqInicial = 10 ! Frequencia inicial da analise harmonica
FreqFinal = 10 ! Frequencia final da analise harmonica
FreqPassos = 1 ! Número de substeps da analise harmonica
tensao = 160 ! Voltagem aplicada nos PZTs
Ecobre = 0.00013 ! Espessura do cobre
Epzt = 0.00025 ! Espessura do PZT
Dpzt = 0.0235 ! Diâmetro do disco de PZT
Hcam = 0.0026 ! Altura da câmara
Dcam = 0.030 ! Diâmetro da câmara
Lcondut = 0.005 ! Comprimento do condutor da câmara para as válvulas
Dtubo = 0.0023 ! Diâmetro dos bocais
Ltubo = 0.005 ! Comprimento dos bocais
Cvalv = 0.007 ! Comprimento dos cones
Dmaior = 0.002 ! Diâmetro maior dos cones
Dmenor = 0.002 ! Diâmetro menor dos cones
element = 0.0005 ! Dimensão do elemento
Flstr = 0.2*element ! Fluido com estrutura

!=====
! Geometria
!=====
CSYS,4 ! Utiliza o WorkingPlane (WP) como referência
WPROTA,0,-90 ! Rotaciona o WP em -90o na direção de X
CYL4,0,0,Dcam/2,,Dcam/2,,Hcam ! Cria o volume da câmara (Fluido c/ estrutura)
WPOFFS,0,0,Flstr ! Desloca o WP de Hcam na dir. Z
CYL4,0,0,(Dcam-2*Flstr)/2,,,,Hcam-2*Flstr ! Cria o volume da câmara (Fluido s/ estrutura)
WPOFFS,0,0,Hcam-Flstr ! Desloca o WP de Iso na dir. Z
CYL4,0,0,Dcam/2,,,,Ecobre ! Cria o volume do metal
WPOFFS,0,0,Ecobre ! Desloca o WP de Emetal na dir. Z
CYL4,0,0,Dpzt/2,,,,Epzt ! Cria o volume do PZT
WPCCSYS,-1,0 ! Retorna o WP ao estado original

CSYS,4
WPROTA,0,0,90
WPOFFS,0,Hcam/2,Dcam/2
CYLIND,Dtubo/2,,Lcondut,Lcondut-Flstr ! Cria o volume do condutor
CYLIND,Dtubo/2-Flstr,,Lcondut,Lcondut-Flstr ! Cria o volume do condutor
WPOFFS,0,0,-Dcam
CYLIND,Dtubo/2,,Lcondut+Flstr,Lcondut ! Cria o volume do condutor
CYLIND,Dtubo/2-Flstr,,Lcondut+Flstr,Lcondut ! Cria o volume do condutor

WPOFFS,0,0,-Lcondut+Flstr
CYL4,0,0,Dtubo/2,,,,-Flstr ! Cria o volume do tubo de entrada
CYL4,0,0,Dmaior/2-Flstr,,,,-Flstr ! Cria o volume do tubo de entrada
WPOFFS,0,0,-Flstr
CON4,0,0,Dmaior/2,Dmenor/2,-Cvalv ! Cria o cone de entrada (fluido c/ estr.)
CON4,0,0,Dmaior/2-Flstr,Dmenor/2-Flstr,-Cvalv ! Cria o cone de entrada (fluido c/ estr.)
WPOFFS,0,0,-Cvalv
CYL4,0,0,Dtubo/2,,,,-Flstr ! Cria o volume do tubo de entrada
CYL4,0,0,Dmenor/2-Flstr,,,,-Flstr ! Cria o volume do tubo de entrada
WPOFFS,0,0,-Flstr

CYL4,0,0,Dtubo/2,,,,-Ltubo+Flstr ! Cria o volume do tubo de entrada
CYL4,0,0,Dtubo/2-Flstr,,,,-Ltubo+Flstr ! Cria o volume do tubo de entrada

WPOFFS,0,0,Flstr+Cvalv+Lcondut+Dcam+Lcondut-Flstr
CYL4,0,0,Dtubo/2,,,,Flstr ! Cria o volume do tubo de entrada
CYL4,0,0,Dmenor/2-Flstr,,,,Flstr ! Cria o volume do tubo de entrada
WPOFFS,0,0,Flstr
CON4,0,0,Dmenor/2,Dmaior/2,Cvalv ! Cria o cone de entrada (fluido c/ estr.)
CON4,0,0,Dmenor/2-Flstr,Dmaior/2-Flstr,Cvalv ! Cria o cone de entrada (fluido c/ estr.)
WPOFFS,0,0,Cvalv
CYL4,0,0,Dtubo/2,,,,Flstr ! Cria o volume do tubo de entrada
CYL4,0,0,Dmaior/2-Flstr,,,,Flstr ! Cria o volume do tubo de entrada
WPOFFS,0,0,Flstr
CYL4,0,0,Dtubo/2,,,,Ltubo-Flstr ! Cria o volume do tubo de entrada
CYL4,0,0,Dtubo/2-Flstr,,,,Ltubo-Flstr ! Cria o volume do tubo de entrada

! Somando os volumes do fluido sem estrutura
VSEL,S,,,2
VSEL,A,,,6,24,2
VADD,ALL
ALLS

! Somando os volumes do fluido com estrutura
VSEL,S,,,1
VSEL,A,,,5,23,2

```

```

VADD,ALL
ALLS

! Subtraindo o fluido sem estrutura do fluido com estrutura
VSBV,2,25,,DELETE,KEEP

! Gera o bloco para subtração de metade do modelo (condição de simetria)
WPCSYS,-1,0 ! Retorna o WP ao estado original
BLC4,-(Dcam+Lcondut+Cvalv+Ltubo),-Hcam,2*(Dcam+Lcondut+Cvalv+Ltubo),3*Hcam,Dcam
VSBV,all,2,,DELETE,DELETE
VGLUE,all
NUMCMP,all

! APLICAÇÃO DOS MATERIAIS E ELEMENTOS
!-----
VSEL,S,,1 ! Propriedades do metal
VATT,1,,1

VSEL,S,,2 ! Propriedades do Fluido com estrutura
VATT,3,,3

VSEL,S,,3 ! Propriedades dos PZTs
VATT,2,,2

VSEL,S,,4 ! Propriedades do Fluido sem estrutura
VATT,3,,4
ALLS

!=====
! GERAÇÃO DA MALHA
!=====
LSEL,S,LOC,X,Dcam/2+Lcondut-0.001,Dcam/2+Lcondut+Cvalv+0.001
LSEL,A,LOC,X,-(Dcam/2+Lcondut-0.001),-(Dcam/2+Lcondut+Cvalv+0.001)
LESIZE,all,element/2,,,,1
alls

ESIZE,element
MSHAPE,1
VMESH,all

!=====
! APLICAÇÃO DE FSI (Fluid-Solid Interface)
!=====
ASEL,S,,10
SFA,all,,FSI
alls

!=====
! DEFINIÇÃO DE IMPEDÂNCIA UNITÁRIA NOS CONTORNOS DO MODELO
! (impede que a onda reflita)
!=====
ASEL,S,,3
ASEL,A,,10
ASEL,A,,40,66
ASEL,U,,44,64,20
SFA,ALL,,IMPD,1
ALLS

!=====
! ACOPLAMENTO DOS NÓS DAS SUPERFÍCIES DOS PZTs
! (união dos nós ligados ao terra)
!=====
ASEL,S,,7
NSLA,S,1
CP,1,VOLT,all
alls

!=====
! CONDIÇÕES DE CONTORNO
!=====
ASEL,S,LOC,Z,0 ! Simetria
NSLA,S,1
DSYM,SYMM,Z
alls

LSEL,S,,12,13 ! Contorno fixo (base inferior do metal)
NSLL,S,1
D,all,UX,0
D,all,UY,0
D,all,UZ,0
alls

LSEL,S,,14,15 ! Contorno fixo (base superior do metal)
NSLL,S,1
D,all,UY,0
alls

ASEL,S,,3 ! Contorno fixo (Câmara, válvulas e tubos)
ASEL,A,,40,66
ASEL,U,,44,64,20
NSLA,S,1
D,all,UX,0
D,all,UY,0
D,all,UZ,0

```

```

ASEL,S,,,8                      ! Voltagem
NSLA,S,1
D,all,VOLT,tensao

ASEL,S,,,7                      ! Voltagem terra
NSLA,S,1
D,all,VOLT,0

ASEL,S,,,13,14                  ! Pressão nula
ASEL,A,,,64,67,3
NSLA,S,1
D,all,PRES,0

alls
FINISH

!=====
! SOLUÇÃO
!=====
/SOLU
!antype, HARMIC
!KBC,1
!HARFRQ, FreqInicial,FreqFinal
!NSUBST, FreqPassos
!solve
!save

ANTYPE,MODAL
MODOPT,UNSYM,5
SOLVE
SAVE

!=====
! PÓS-PROCESSAMENTO (POST1)
!=====
/POST1

```

APÊNDICE B: DESENHOS TÉCNICOS DO PROTÓTIPO FABRICADO

Medidas em milímetros.

Designed by Andres Choi	Checked by	Escala 1:1	Date 9/2/2009	Material Acrílico
Escola Politécnica da USP		Carcaça		
		CARCACA	Edition 0	Sheet 1 / 1

Medidas em milímetros.

Designed by Andres Choi	Checked by	Escala 1:1	Date 9/2/2009	Material Alumínio
Escola Politécnica da USP		Cabecote Superior		
		Cabecote_Superior	Edition 0	Sheet 1 / 1

Medidas em milímetros.

Designed by Andres Choi	Checked by	Escala 1:1	Date 9/2/2009	Material Acrílico
Escola Politécnica da USP		Cabeçote Inferior		
		Cabecote_Inferior	Edition 0	Sheet 1 / 1

Medidas em milímetros.

Designed by Andres Choi	Checked by	Escala 2:1	Date 9/2/2009	Material Alumínio
Escola Politécnica da USP		Válvula		
		Valvula	Edition 0	Sheet 1 / 1

Medidas em milímetros.

Designed by Andres Choi	Checked by	Escala 2:1	Date 9/2/2009	Material Acrílico
Escola Politécnica da USP		Bocal		
		Bocal	Edition 0	Sheet 1 / 1