PAULO HENRIQUE NAKASONE

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE UMA BOMBA DE FLUXO
PIEZELÉTRICA UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

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

**São Paulo
2006**

PAULO HENRIQUE NAKASONE

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE UMA BOMBA DE FLUXO
PIEZELÉTRICA UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

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

**Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica**

**Orientador:
Prof. Livre-Docente
Emílio Carlos Nelli Silva**

**São Paulo
2006**

FICHA CATALOGRÁFICA

Nakasone, Paulo Henrique

Estudo de viabilidade de uma bomba de fluxo piezelétrica utilizando simulação computacional / P.H. Nakasone. -- São Paulo, 2006.

138 p.

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

**1.Simulação computacional 2.Método dos elementos finitos
3.Dinâmica de fluidos computacional 4.Atuadores piezelétricos
5.Otimização I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas
Mecânicos II.t.**

A minha família e amigos pelo carinho e constante
incentivo em realizar este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Livre Docente Emílio Carlos Nelli Silva pelo constante incentivo e pelo aprendizado proporcionado ao longo deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de mestrado concedida.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram na execução deste trabalho.

RESUMO

As bombas de fluxo, além das aplicações clássicas em Engenharia, são instrumentos importantes em áreas como a biologia, farmácia e medicina. Um novo princípio para o bombeamento de fluidos está sendo estudado dentro do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O presente projeto trata deste princípio: a utilização de um atuador piezelétrico bilaminar inserido num meio fluido para geração de vazão. O objetivo deste projeto é verificar a viabilidade desta bomba piezelétrica através de simulações computacionais, estudando a sensibilidade do sistema a diversos parâmetros e realizando a otimização do mesmo de forma a maximizar seu desempenho. O software ANSYS é utilizado para a simulação computacional do problema de dinâmica de fluidos e para modelar o atuador piezelétrico bilaminar, e o software Altair Hyperstudy na etapa de otimização. O texto apresenta as metodologias empregadas e discute os resultados obtidos, de forma a analisar os fenômenos físicos em questão e validar este novo princípio proposto.

ABSTRACT

Flow pumps, besides their classical applications in Engineering, are important devices in areas such as Biology, Pharmacy and Medicine. A novel principle for fluid pumping has been studied at the Department of Mechatronic Engineering and Mechanical Systems of the Engineering School of the University of Sao Paulo. The current project deals with this principle: the use of a bimorph piezoelectric actuator in a fluid environment for flow generation. The objective of this project is to verify the viability of this pump through computational simulations, by performing a sensitivity analysis for various parameters and an optimization to maximize its performance. The ANSYS software is used for the computational fluid dynamics simulations and for modeling the bimorph piezoelectric actuator, and the Altair Hyperstudy software for the optimization. The text presents the employed methodologies and discusses the obtained data in order to analyze the physical phenomena involved and to validate this novel principle.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO	17
1.1. Princípio de Funcionamento	21
1.2. Princípio de Bombeamento	23
1.3. Objetivo.....	26
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1. Atuadores Piezelétricos Bilaminares.....	27
2.2. Modelagem Computacional	29
2.3. Método de Elementos Finitos (Software “ANSYS”).....	31
2.3.1. Condições de Contorno Móveis (Formulação ALE)	36
2.3.2. Discretização das Equações	38
2.3.3. Algoritmo de Solução	40
2.3.4. Algoritmo de Solução Segregado.....	43
2.3.5. Linguagem APDL	43
2.3.6. Tratamento dos dados no ANSYS	44
2.4. Método dos Volumes Finitos (Software “Fluent”)	47
2.5. Otimização	47
2.6. “Altair Hyperstudy” (Software de Otimização).....	49
2.6.1. Métodos de Otimização Empregados	51
3. MODELOS PROPOSTOS.....	55
4. RESULTADOS COMPUTACIONAIS	59
4.1. Aferição da Modelagem Computacional	59
4.2. Resultados Preliminares da Bomba Piezelétrica	66
4.2.1. Modelagem do Atuador.....	66
4.2.2. Malha Fixa x Malha Móvel.....	69
4.2.3. Influência da Componente ‘x’ de velocidade.....	72
4.2.4. Dados Experimentais	73
4.3. Atuador Piezelétrico Bilaminar.....	78

4.4. Atuador em Meio Fluido	83
4.5. Dados Experimentais Atualizados	92
4.6. Máxima Pressão	97
4.7. Simulação Utilizando Outros Fluidos	98
4.7.1. Simulação para Etanol.....	99
4.7.2. Simulação para Sangue	100
4.8. Redução da Escala.....	102
4.8.1. Atuador em Meio Fluido	102
4.8.2. Simulação para Bomba Piezelétrica em Escala Reduzida	104
5. ESTUDO DE SENSIBILIDADE.....	108
5.1. Sensibilidade em Relação à Frequência.....	108
5.2. Sensibilidade em Relação à Tensão Elétrica.....	109
5.3. Sensibilidade em Relação à Altura do Duto	110
6. OTIMIZAÇÃO	111
6.1. Otimização para Água.....	111
6.2. Otimização para Etanol.....	112
6.3. Otimização com Pressão de Saída.....	113
7. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	114
8. ANEXOS	116
8.1. Software Fluent	116
8.1.1. Algoritmo de Solução Segregado x Acoplado	116
8.1.2. Linearização: Implícita x Explícita	117
8.1.3. Discretização	118
8.1.4. Malha Móvel	120
8.2. “Altair Hyperstudy”	121
8.3. “ANSYS”	126
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
10. APÊNDICE	i
10.1. Rotina em APDL para simulação do “Piezoelectric Fan” no ANSYS	i
10.2. Rotina em C para aplicação das condições de contorno no “Fluent”	iv
10.3. Rotina em APDL para simulação da Bomba Piezelétrica no ANSYS.....	vii

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Princípio de onda propagante	18
Figura 1.2. Possível configuração para a bomba ultra-sônica.....	18
Figura 1.3. Bomba piezelétrica com diafragma	18
Figura 1.4. Bomba “valve-less”	19
Figura 1.5. Princípio de funcionamento da bomba de fluxo proposta	21
Figura 1.6. Atuador piezelétrico bilaminar (vista isométrica)	22
Figura 1.7. Geração de vórtices.....	23
Figura 1.8. Veículo aquático.	24
Figura 2.1. Esquema de um atuador piezelétrico bilaminar.....	29
Figura 2.2. Exemplo de malha de elementos	31
Figura 2.3. Elemento FLUID141	32
Figura 2.4. Condições de contorno móveis.....	36
Figura 2.5. Malha de elementos em tempos diferentes.....	37
Figura 2.6. Cálculo da vazão.....	44
Figura 2.7. Parâmetros da bomba.....	48
Figura 2.8. Interação do software de otimização com o de elementos finitos	50
Figura 2.9. Funcionamento do software de otimização	51
Figura 2.10. Superfícies de resposta (Altair, 2003)	52
Figura 2.11. Seleção das direções de busca usando o método das direções viáveis	53
Figura 3.1. Esquema da bomba piezelétrica.....	55
Figura 3.2. Condições de contorno para malha fixa (primeiro modelo)	56
Figura 3.3. Atuador modelado como corpo rígido articulado.....	56
Figura 3.4. Atuador modelado como corpo elástico	57
Figura 3.5. Atuador piezelétrico bilaminar inserido no meio fluido.....	58
Figura 4.1. Montagem experimental do ventilador piezelétrico	59
Figura 4.2. Sistema para simulação do piezofan.....	60
Figura 4.3. Malha utilizada no ANSYS.	62
Figura 4.4. Linhas de fluxo obtidas no ANSYS.	62

Figura 4.5. Malha utilizada no Fluent.	63
Figura 4.6. Linhas de fluxo obtidas no Fluent.	63
Figura 4.7. Velocidades 'x' e 'y' (ANSYS).....	65
Figura 4.8. Velocidades 'x' e 'y' (Fluent).....	65
Figura 4.9. Perfil de deslocamentos do atuador (normalizado)	67
Figura 4.10. Deslocamentos transversais	67
Figura 4.11. Relações geométricas.....	68
Figura 4.12. Vetores de velocidade no atuador.....	69
Figura 4.13. Malha de elementos finitos.....	69
Figura 4.14. Vazão para os modelos de malha móvel (a) e malha fixa (b).....	71
Figura 4.15. Detalhe do gráfico de vazão	71
Figura 4.16. Pressões no sistema com malha móvel (a) e malha fixa (b)	72
Figura 4.17. Vazão para os modelos de malha móvel (a) e fixa (b), considerando 'vx'	73
Figura 4.18. Geometria do protótipo caracterizado	74
Figura 4.19. Malha para simulação da bomba piezelétrica.....	75
Figura 4.20. Vazão média para uma amplitude de 150 μ m	76
Figura 4.21. Vazão média para uma amplitude de 200 μ m	76
Figura 4.22. Vazão média para uma frequência de 250 μ m.....	77
Figura 4.23. Dimensões do atuador piezelétrico.....	78
Figura 4.24. Aplicação de cargas no bilaminar.....	79
Figura 4.25. Malha de elementos para o atuador bilaminar piezelétrico	79
Figura 4.26. Deslocamentos verticais do atuador	80
Figura 4.27. Primeiro modo de vibrar (f=76,5Hz).....	80
Figura 4.28. Segundo modo de vibrar (f=963,5Hz).....	80
Figura 4.29. Terceiro modo de vibrar (f=2881,0Hz)	80
Figura 4.30. Malha de elementos para o atuador bilaminar piezelétrico com revestimento	81
Figura 4.31. Deslocamentos verticais do atuador bilaminar revestido	81
Figura 4.32. Malha de elementos finitos: fronteira de interação fluido- estrutura (a) e condições de contorno de deslocamento e tensão (b).	83

Figura 4.33. Detalhe da aplicação de condições de contorno.	84
Figura 4.34. Impedância elétrica e deslocamento na extremidade do atuador simulados no ANSYS (0 a 50Hz)	85
Figura 4.35. Primeiro modo de vibrar (20Hz).....	85
Figura 4.36. Impedância elétrica e deslocamento na extremidade do atuador simulados no ANSYS (200 a 500Hz)	86
Figura 4.37. Segundo modo de vibrar (278Hz).....	87
Figura 4.38. Curva experimental de impedância elétrica do atuador (200 a 500Hz).....	87
Figura 4.39. Modos de vibrar do atuador bilaminar piezelétrico	88
Figura 4.40. Impedância elétrica do atuador bilaminar simulada no ANSYS (500 a 4000Hz).....	89
Figura 4.41. Terceiro modo de vibrar (1190Hz)	89
Figura 4.42. Quarto modo de vibrar (3288Hz)	89
Figura 4.43. Curva experimental de impedância elétrica do atuador (500 a 4000Hz).....	90
Figura 4.44. Geometria para segundo modo de vibrar.....	92
Figura 4.45. Malha de elementos finitos (3226 elementos).....	93
Figura 4.46. Vazão média (2º modo de vibrar)	94
Figura 4.47. Vetores de velocidade da bomba piezelétrica.....	95
Figura 4.48. Campo de pressões da bomba piezelétrica	95
Figura 4.49. Seqüência de teste experimental da bomba piezelétrica (Nakasone et al., 2005; Pires et al., 2005).....	96
Figura 4.50. Curvas de vazão para diferentes pressões de saída.....	97
Figura 4.51. Curva vazão x pressão para a bomba piezelétrica	98
Figura 4.52. Vazão média para etanol.....	100
Figura 4.53. Vazão média para sangue	101
Figura 4.54. Malha de elementos finitos.....	102
Figura 4.55. Impedância elétrica para o atuador em escala menor (200 a 1000Hz).....	103
Figura 4.56. Deslocamentos no atuador para 588Hz	103
Figura 4.57. Deslocamentos do atuador para 10.000Hz	104

Figura 4.58. Malha de elementos finitos.....	104
Figura 4.59. Vazão média para bomba em escala reduzida	105
Figura 4.60. Vetores de velocidade para a bomba em escala reduzida.....	106
Figura 4.61. Campo de pressões para a bomba em escala reduzida	106
Figura 5.1. Sensibilidade em relação à frequência.....	108
Figura 5.2. Sensibilidade em relação à tensão elétrica.....	109
Figura 5.3. Sensibilidade em relação à altura do duto	110
Figura 6.1. Função objetivo (água)	112
Figura 8.1. Exemplo de volume de controle	119
Figura 8.2. Suavização elástica	120
Figura 8.3. Processo dinâmico de camadas.....	121
Figura 8.4. Definição das variáveis.....	123
Figura 8.5. Variáveis de projeto	123
Figura 8.6. Formato do template	124
Figura 8.7. Determinação da vazão.....	125
Figura 8.8. Conferindo o valor da expressão	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALE	“Arbitrary Lagrangian-Eulerian”
APDL	“ANSYS Parametric Design Language”
CFD	“Computational Fluid Dynamics”
COLG	“Collocated Galerkin”
MEF	Método de Elementos Finitos
MSU	“Monotone Streamline Upwind”
PZT	Piezelétrico
SIMPLE	“Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations”
SUPG	“Streamline Upwind / Petro-Galerkin”
TDMA	“Tri-Diagonal Matrix Algorithm”

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	tensor de tensões
e	tensor de coeficientes piezelétricos
S	tensor de deformações
ϵ_D^S	tensor de permissividades elétricas medido com deformação constante
D	vetor deslocamento elétrico
c^E	tensor de rigidez medido com campo elétrico constante
E	vetor campo elétrico
$M_{sistema}$	massa do sistema
$P_{sistema}$	quantidade de movimento do sistema
$E_{sistema}$	energia do sistema
v_x, v_y, v_z	componentes de velocidade nas direções, x, y e z
ρ	densidade
x, y, z	coordenadas globais cartesianas
t	tempo
P	Pressão
τ_{ij}	tensor de tensões
u_i	velocidades ortogonais ($u_1 = v_x; u_2 = v_y; u_3 = v_z$)
μ	viscosidade dinâmica
λ	segundo coeficiente de viscosidade
g_x, g_y, g_z	componentes de aceleração provenientes da gravidade
μ_e	viscosidade efetiva
R_x, R_y, R_z	resistências distribuídas
T_x, T_y, T_z	termos de perdas viscosas
$\bar{v}_x$	valor médio da velocidade na direção x
v'_x	valor flutuante da velocidade na direção y
U_n	Deslocamento na direção normal
U_τ	Deslocamento na direção tangente

u	Vetor normal
τ	Vetor tangente
V_n	Velocidade na direção normal
V_τ	Velocidade na direção tangente
ϕ	grau de liberdade genérico
$\mathbf{w}$	velocidade da malha móvel
C_ϕ	transiente e coeficiente de advecção
Γ_ϕ	coeficiente de difusão
S_ϕ	termo de geração
$C_{2\tau}$	Coeficiente global
h_a	Comprimento do elemento ao longo da direção de advecção
U_{mag}	Velocidade absoluta
Pe	Número de Peclet
Q	Vazão
$\mathbf{V}$	Vetor velocidade
$\mathbf{A}$	Vetor normal à área
h	Altura do canal
d	Espessura do canal
$\bar{v}$	Valor médio da velocidade na saída da bomba
$\mathbf{I}$	Matriz identidade
$\bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}}$	Tensor de tensões
$\mathbf{F}$	Vetor de forças
p	Pressão do fluido
$\mathbf{q}$	Fluxo de calor
f	Frequência de oscilação
A	Amplitude de oscilação
$NCON$	número de restrições
NDV	número de variáveis de projeto
A_{i0}, A_{ij}, A_{ijk}	coeficientes polinomiais

f	Função objetivo
g_j	Restrições
$\mathbf{s}$	Vetor direção
v_x	Componente 'x' de velocidade
L_{entrada}	Comprimento da região de entrada
L_{atuador}	Comprimento do atuador
$L_{\text{saída}}$	Comprimento da região de saída
L_{total}	Comprimento total do atuador
L_{PZT}	Comprimento da cerâmica piezelétrica
L_{engaste}	Comprimento da região de engaste
e_{PZT}	Espessura da cerâmica piezelétrica
e_{metal}	Espessura do metal
E	Módulo de elasticidade

1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

Dentre as aplicações de atuadores piezelétricos, a construção de bombas de fluxo de precisão, ou seja, bombas de pequena potência para deslocamento de pequenos volumes de fluido tem sido pesquisada recentemente. A área de Bioengenharia tem demonstrado grande interesse por este tipo de equipamento para uma possível aplicação em bombeamento sanguíneo ou para dosagem de reagentes e medicamentos (Teymoori; Abbaspour-Sani, 2004), como por exemplo, injeção contínua de insulina em pacientes diabéticos durante o dia, eliminando surtos e déficits desta substância. Dentre outras possíveis aplicações, destaca-se o resfriamento de componentes eletrônicos.

Novos princípios para bombeamento de fluidos visando aplicações na área biomédica vêm sendo pesquisados no Brasil e em todo o mundo. No Brasil, por exemplo, existe a proposta da Bomba Espiral (Andrade, et al., 1996), pesquisada e desenvolvida pelo Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia em conjunto com o Baylor College of Medicine (Houston, Texas) e que combina o princípio de duas bombas já conhecidas: a axial e a radial.

Estes novos princípios têm sido pesquisados como forma de se contornar os problemas presentes nas atuais técnicas de bombeamento de fluidos biológicos, sendo uma das mais relevantes, a morte de microorganismos e células durante este processo, seja pela pressão a que o fluido é submetido ou mesmo a turbulência no escoamento. Nas atuais técnicas de bombeamento sanguíneo, por exemplo, as taxas de hemólise (morte das hemáceas) são relativamente elevadas, prejudicando a sua aplicação. Acredita-se que com novas técnicas, este problema possa ser minimizado (Andrade et al., 1996).

Figura 1.1. Princípio de onda propagante

Figura 1.2. Possível configuração para a bomba ultra-sônica

No campo de bombas de fluxo piezelétricas, um dos exemplos é a bomba ultra-sônica (Sashida; Kenjo, 1993; Ueha et al. ,1993; Bar-Cohen; Chang, 2001; Kuribayashi; Ueha; Mori, 1985; Nakamura; Kurosawa; Ueha, 1991, Miyazaki; Kawai; Araragi, 1991), que, utilizando estatores feitos de material elástico atuado por cerâmicas piezelétricas, movimenta o fluido através do princípio da propagação de onda. Na fig. 1.1 pode-se ver melhor este princípio de funcionamento com o líquido sendo arrastado devido ao movimento da onda propagante no meio sólido. Na fig. 1.2 nota-se uma possível configuração para esta bomba, utilizando dois estatores e gerando um efeito semelhante ao peristaltismo observado no esôfago ou intestino humanos.

Figura 1.3. Bomba piezelétrica com diafragma

Outro exemplo de bomba piezelétrica é a bomba com diafragma de Koch et al. (1998) e Ullman; Fono; Taitel (2001), que utiliza o material piezelétrico como atuador, movendo o diafragma para cima e para baixo como um pistão. A direção do fluxo é garantida por válvulas que permitem o fluxo em um único sentido.

Na fig. 1.3 é mostrado o funcionamento desse sistema e a atuação da cerâmica piezelétrica: movendo o diafragma para cima, a válvula de saída se fecha e a válvula de entrada se abre permitindo a entrada de líquido, na situação contrária, com o diafragma descendo, a válvula de entrada se fecha enquanto a de saída se abre, fazendo com que o fluido interno seja expulso. Assim, consegue-se fluxo num único sentido. Nguyen; Truong (2004); Mu; Hung; Ngoi (1999) também apresentam trabalhos relativos ao princípio mencionado.

Figura 1.4. Bomba “valve-less”

Na fig. 1.4 é mostrado o esquema de uma bomba piezelétrica sem válvulas (“valveless”), de Ullman; Fono; Taitel (2001). Seu funcionamento é similar ao caso anterior, onde a cerâmica piezelétrica age como um pistão e a direção do fluxo é conseguida através da geometria difusora nas regiões de entrada e saída do fluido, uma vez que a resistência ao fluxo da esquerda para a direita é menor do que da direita para a esquerda, gerando assim um fluxo resultante no sentido desejado.

Um outro princípio de funcionamento para bombas de fluxo piezelétricas é o de Kar et al (1998), que reproduz o funcionamento de uma seringa, conseguindo dosagens da ordem de nanolitros através do controle de tensão aplicada na cerâmica piezelétrica.

Maiores detalhes sobre as diferentes técnicas e princípios utilizados no desenvolvimento de novas bombas de fluxo podem ser encontrado em Laser; Santiago (2004), onde um amplo estudo sobre os princípios utilizados em microbombas de fluxo foi realizado. Comparações qualitativas e quantitativas também são feitas, através da análise de valores máximos de vazão e pressão geradas

por diferentes bombas e também de parâmetros como fatores de escala, eficiência termodinâmica e frequência de bombeamento próprio (um parâmetro que relaciona a vazão máxima da bomba com as suas dimensões).

A simulação computacional tem auxiliado o projeto de partes dessas novas bombas desde a sua concepção (Bar-Cohen; Chang, 2001) até o projeto de suas partes, como por exemplo, no projeto de válvulas direcionais. (Gamboa; Morris; Forster, 2003; Olsson; Stemme; Stemme, 2000).

Assim, este projeto visa a simulação computacional e otimização de um sistema de bombeamento através de um princípio de funcionamento alternativo e inovador, conforme será descrito na seção seguinte deste documento.

1.1. Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento proposto neste trabalho busca representar um fenômeno observado na natureza: o nadar de um peixe. Este fenômeno é estudado por autores como Videler; Muller; Stamhuis (1999), Pedley; Hill (1999), Drucker; Lauder (2001), Trintafyllou; Tryantafyllou; Grosenbaugh (1993) e Sfakiotakis; Lane; Davies (1999).

Figura 1.5. Princípio de funcionamento da bomba de fluxo proposta

A fig. 1.5 ajuda a compreender o princípio de funcionamento proposto para esta bomba.

Sabe-se que, para nadar, o peixe realiza um movimento oscilatório com seu corpo e sua cauda deslocando-se para frente. Mas o que aconteceria ao segurá-lo enquanto tenta nadar? Provavelmente o fluido se movimentaria no sentido oposto ao qual o peixe tenta se dirigir, ou seja, ele estaria fazendo o papel de uma bomba de fluxo.

A proposta da bomba piezelétrica é a utilização de um atuador piezelétrico bilaminar para reproduzir este movimento oscilatório do peixe para geração de vazão em um meio fluido. Este tipo de atuador possui o formato de uma lâmina e, quando acionado com uma tensão elétrica alternada, produz o movimento desejado, conforme ilustra a fig. 1.6.

Figura 1.6. Atuador piezelétrico bilaminar
(vista isométrica)

Esse fenômeno já vem sendo estudado por outros pesquisadores como é o caso de Bürmann; Raman; Garimella (2002), Açikalin; Raman; Garimella (2003), Açikalin et al. (2004) e Basak; Raman; Garimella (2005), sendo que a aplicação desenvolvida por esses pesquisadores tem o foco voltado à utilização do atuador bilaminar para o resfriamento de componentes eletrônicos. Os mesmos apresentam resultados computacionais e experimentais de seu dispositivo, bem como um estudo relativo à resposta dinâmica do atuador. Kim; Wereley; Chun (2004); Ihara; Watanabe (1994) apresentam alguns resultados analíticos e computacionais sobre o fluxo gerado através de um atuador bilaminar piezelétrico. Loh et al. (2001) utiliza um atuador piezelétrico para movimentar uma barra produzindo um movimento oscilatório e estuda os efeitos do fluxo gerado no aumento da transferência de calor por convecção. Os autores citados utilizam, no entanto, ar como fluido de trabalho, visando aplicações em refrigeração.

1.2. Princípio de Bombeamento

Figura 1.7. Geração de vórtices

O escoamento de fluido através de corpos gera vórtices como pode ser observado em Fig. 1.7a e Fig. 1.7b. O sentido desses vórtices gerados cria uma força de arrasto sobre o corpo, contrária ao sentido de escoamento do fluido.

Supondo uma lâmina oscilante em meio fluido, ou mesmo a movimentação de um peixe em tal meio (Sfakiotakis; Lane; Davies, 1999) o que ocorre é a geração de uma esteira de vórtices com orientação contrária à esteira de vórtices de Karman. Esta orientação de vórtices, ao invés de gerar uma força de arrasto, gera uma força no sentido contrário ao mesmo, favorecendo o escoamento nesse sentido (Fig. 1.7c).

O mecanismo de geração destes vórtices pelos peixes ainda é incerto (Sfakiotakis; Lane; Davies, 1999). De acordo com Lighthill (1969 apud Sfakiotakis; Lane; Davies, 1999) e Videler (1993 apud Sfakiotakis; Lane; Davies, 1999), a esteira de Karman invertida deve ser gerada somente pela movimentação da cauda do peixe. Rosen (1959 apud Sfakiotakis; Lane; Davies, 1999), através de experimentos de

visualização observou vórtices sendo gerados na metade anterior de corpos de peixes, de onde os mesmos estariam retirando a energia rotacional para se moverem.

Anderson et al. (1993) e Gopalkrishnan et al. (1994) estudam a vorticidade gerada por lâminas oscilantes e as forças de propulsão envolvidas nesses fenômenos, de forma a otimizar os efeitos propulsivos.

Borgen; Washington; Kinzel (2003) apresentam o estudo de um veículo aquático com propulsor baseado numa lâmina oscilante, movendo-se através da geração de uma esteira de vórtices invertidos (Fig. 1.8).

Figura 1.8. Veículo aquático.

A modelagem dos vórtices gerados por um corpo oscilando em meio fluido é complexa de ser obtida através de modelos analíticos, podendo ser obtida por simulação computacional.

A simulação computacional tem auxiliado o projeto desses novos tipos de bombas (Nakasone; Pires; Silva, 2004; Nakasone et al, 2005; Pires; Nakasone; Silva, 2004; Pires et al, 2005; Pires et al, 2006; Açikalin; Raman; Garimella, 2003; Bar-Cohen; Chang, 2001), além de viabilizar a caracterização do sistema (com o cálculo de vazão média, por exemplo), sem a necessidade de construção de protótipos, agilizando os ciclos de projetos. Para análise de sensibilidade esta importância fica ainda mais nítida, pois seria inviável construir um número de protótipos que permitisse o levantamento de uma curva de resposta para a bomba para diferentes configurações geométricas. Desta forma, o enfoque deste trabalho é a simulação computacional da bomba, análise de sensibilidade e sua otimização.

Na simulação computacional foi considerado o software comercial ANSYS (que implementa o método de elementos finitos, MEF) e o software Altair Hyperstudy (Altair, 2005) para realizar a otimização.

Nos capítulos posteriores serão apresentados e discutidos os itens: fundamentação teórica (atuadores piezelétricos, modelagem computacional, software ANSYS, otimização, software “Altair Hyperstudy”); modelos propostos para a bomba piezelétrica; aferição das técnicas de modelagem; resultados para a bomba piezelétrica; resultados para análise do atuador bilaminar piezelétrico (modos de vibrar no vácuo e na água, impedância elétrica); resultados atualizados para a bomba piezelétrica; simulações da bomba piezelétrica para diferentes fluidos; simulações para a bomba piezelétrica em escala reduzida; análise de sensibilidade; problema de otimização para diferentes fluidos e condições de trabalho; conclusões e trabalhos futuros.

1.3. Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar o estudo de viabilidade para a bomba de fluxo piezelétrica através da utilização de simulações computacionais. Conforme mencionado, a simulação computacional tem se mostrado uma importante ferramenta no projeto de novas configurações para bombas de fluxo, especialmente aquelas com princípios de funcionamento e formas de acionamento diferentes das convencionais, como é o caso das bombas piezelétricas.

Visa-se também analisar os parâmetros construtivos da bomba e sua influência no desempenho da mesma através de uma análise de sensibilidade, realizando-se, finalmente um processo de otimização para obter parâmetros ótimos de funcionamento, estudos inviáveis sem o uso da simulação computacional como ferramenta. De maneira mais generalista o projeto gera conhecimento em aplicações de atuadores piezelétricos na área de bombas de fluxo, contribuindo também para o desenvolvimento de novas técnicas de bombeamento atuando em diversas áreas do conhecimento e possibilitando a interação e integração com profissionais de Engenharia de diversas áreas (atuadores piezelétricos, simulação computacional, otimização, bioengenharia).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Atuadores Piezelétricos Bilaminares

Para reproduzir o efeito do corpo do peixe oscilando, faz-se uso de um atuador piezelétrico bilaminar. Um material piezelétrico é basicamente um material que submetido a uma certa tensão ou carga elétrica sofre uma deformação, ou ainda, quando sujeito a uma determinada deformação ou tensão mecânica, gera uma tensão elétrica. Trata-se, portanto, de um material capaz de converter energia elétrica em mecânica, ou vice-versa.

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

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

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

onde:

- $\boldsymbol{\tau}$ tensor de tensões
- $\mathbf{e}$ tensor de coeficientes piezelétricos
- $\mathbf{S}$ tensor de deformações
- $\boldsymbol{\epsilon}_D^S$ tensor de permissividades elétricas medido com deformação constante
- $\mathbf{D}$ vetor deslocamento elétrico
- $\mathbf{c}^E$ tensor de rigidez medido com campo elétrico constante
- $\mathbf{E}$ vetor campo elétrico

e são assim definidos (Ikeda, 1996):

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{S}_{jk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right) \quad (2.4)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_D^S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{D_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{D_{11}} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{D_{33}} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi, \text{ onde } \phi \text{ é o potencial elétrico} \quad (2.7)$$

Um piezoatuador bilaminar é um dispositivo eletromecânico que opera em flexão, também conhecido como *cantiléver* bilaminar, porque são normalmente montados como uma viga em balanço. O seu funcionamento é similar ao de um termostato bimetalico, alocando-se uma tira metálica entre duas tiras piezocerâmicas, normalmente um tipo de PZT. Quando se aplica uma tensão elétrica nas piezocerâmicas, o substrato metálico inclina-se com um movimento proporcional à esta tensão. Um piezoatuador bilaminar pode apresentar deslocamentos relativamente grandes, em torno de 1 mm em um comprimento de 40mm, no entanto, produz forças muito pequenas. Um bilaminar com tais dimensões possui uma resposta típica de deslocamento na ordem de 10 $\mu\text{m/V}$ em regime de excitação estático, podendo atingir até 50 $\mu\text{m/V}$ na frequência de ressonância.

A fig. 2.1 mostra a configuração de um bilaminar (PZT/metal/PZT) que possibilita esses deslocamentos devido ao fato das cerâmicas piezelétricas operarem em modos opostos (podendo ser ligadas em série ou em paralelo), ou seja, enquanto uma das cerâmicas se expande a outra se contrai, produzindo uma inclinação do cantiléver bilaminar.

Figura 2.1. Esquema de um atuador piezelétrico bilaminar

2.2. Modelagem Computacional

A utilização da simulação computacional é justificada em situações para as quais a solução analítica é demasiadamente trabalhosa ou mesmo quando não há uma formulação analítica disponível na literatura.

Uma formulação analítica do problema da bomba tornar-se-ia extremamente complexa, inviabilizando a sua solução ou exigindo a adoção de restrições e hipóteses que acabariam por comprometer os resultados. Além disso, um item importante para o projeto, refere-se à caracterização do dispositivo de bombeamento, que pode ser feita de maneira bem mais eficiente através da utilização 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.

Um exemplo bastante prático da utilização de simulações é a análise de sensibilidade. Para mapear o comportamento do sistema para um determinado parâmetro (geométrico, por exemplo) em 10 ou 20 pontos dentro de um domínio, basta alterar a variável desejada e rodar novamente a simulação, o que pode ser feito de forma relativamente rápida. A situação análoga quando se pensa na construção de protótipos seria a construção de 10 ou 20 protótipos, o que, de imediato, é inviável.

Na literatura e em publicações científicas também é possível notar a importância da simulação computacional na bioengenharia. Em “CFDRD – Multidisciplinary Engineering Solutions” (CFDRC, 2005) é possível visualizar vários exemplos de simulação computacional de sistemas de bioengenharia.

Alguns autores também aplicam a simulação computacional como ferramenta de estimativa para os índices de hemólise encontrados em certos tipos de

bombeamento sanguíneo, como é o caso de Yano et al. (2003), Okamoto et al. (2003), Kato et al. (2003), Song; Wood; Olsen (2004), Song et al. (2003).

A simulação computacional para problemas envolvendo fluidos é comumente denominada CFD (“Computational Fluid Dynamics”), sendo uma área bastante ampla. A simulação de bombas dos mais diversos tipos é feita a partir de ferramentas de CFD, promovendo um aumento no desempenho das mesmas e como auxílio em seus projetos, como pode ser visto em Voorde; Vierendeels; Dick (2004), Burgreen et al. (2001) e Gulich (1999).

Neste projeto de mestrado a simulação computacional é utilizada como ferramenta para a simulação e análise do problema da bomba de fluxo e posteriormente para a sua otimização pelo fato de ser um método genérico e poderoso, muito usado na Engenharia atualmente (Bathe, 1996).

Dentro da simulação computacional, existem duas abordagens possíveis: a primeira seria a implementação de um software próprio para a simulação do sistema proposto; a segunda, a utilização de um software comercial para a condução das simulações. A opção pela segunda abordagem foi feita pelo fato deste projeto de mestrado vislumbrar a análise de viabilidade de um dispositivo bombeador de fluidos e não a implementação de um software de elementos ou volumes finitos, que por si só já caracterizaria um projeto completo. A opção por um software comercial possibilita também um maior aprofundamento no estudo do dispositivo, possibilitando a realização de um número maior de simulações e a exploração do problema de otimização.

A escolha do software ANSYS foi feita pelo fato de ser um software 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 que permite também a integração com o otimizador utilizado (Altair Hyperstudy). Numa etapa preliminar, foi utilizado também o software Fluent (volumes finitos) conforme será apresentado na seção 4.1.

Embora a implementação de um software de simulação não esteja no escopo deste plano, faz-se necessário um conhecimento básico sobre a teoria empregada nesses softwares.

2.3. Método de Elementos Finitos (Software “ANSYS”)

O Método de Elementos Finitos (MEF) é atualmente empregado em uma série de análises no ramo de Engenharia, principalmente nos campos estruturais, transferência de calor e fluídica (Bathe, 1995).

Um problema físico a ser resolvido utilizando esta metodologia geralmente envolve uma estrutura existente, ou parte de uma determinada estrutura sujeita a certas cargas.

A transformação do problema físico num modelo matemático requer que certas hipóteses, as quais, juntas levam à formulação de uma série de equações diferenciais que regem o fenômeno, sejam consideradas.

O Método de Elementos Finitos subdivide uma dada estrutura, com uma geometria qualquer, em certo número de elementos de formas mais simples, (geralmente triangulares e quadrangulares). Essa subdivisão gera a chamada malha de elementos. Em cada elemento as equações diferenciais são resolvidas, chegando-se a uma solução para o problema como um todo. A fig. 2.2 mostra um exemplo de uma malha de elementos finitos simples para um problema estrutural de uma viga engastada.

Figura 2.2. Exemplo de malha de elementos

Existem diferentes tipos de elementos para diversos tipos de fenômenos. Um grande cuidado deve ser tomado na escolha de um elemento que contenha em sua formulação um modelo matemático correspondente ao fenômeno físico que se pretende modelar.

O software ANSYS conta com uma vasta biblioteca de elementos para a simulação dos mais diversos tipos de sistemas, incluindo sistemas multidisciplinares,

através do pacote “Multiphysics”. O elemento utilizado nas simulações da bomba piezelétrica é o FLUID141 (fig. 2.3), que é capaz de simular regimes permanentes ou transientes e escoamentos laminares ou turbulentos. O solucionador (“solver”) do ANSYS utilizado para essas análises é o “FLOTRAN”. Na fig. 2.5 adiante é possível observar uma malha de elementos finitos criada no software.

Figura 2.3. Elemento FLUID141

Os graus de liberdade deste elemento são

- velocidades em ‘x’ e ‘y’;
- pressão;
- temperatura;
- energia cinética.

Na simulação, essencialmente o software resolve as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, respectivamente (ANSYS, 2003):

$$\left(\frac{dM}{dt} \right)_{sistema} = 0, \text{ onde: } M_{sistema} = \int_{massa(sistema)} dm = \int_{\forall} \rho d\forall \quad (2.8)$$

$$\mathbf{F} = \left(\frac{d\mathbf{P}}{dt} \right)_{sistema} = 0, \text{ onde: } \mathbf{P}_{sistema} = \int_{massa(sistema)} \mathbf{V} dm = \int_{\forall(sistema)} \mathbf{V} \rho d\forall \quad (2.9)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{sistema}, \text{ onde: } E_{sistema} = \int_{\forall(sistema)} e \rho d\forall, \text{ e: } e = u + \frac{V^2}{2} + gz \quad (2.10)$$

onde:

$M_{sistema}$ massa do sistema

$\mathbf{P}_{sistema}$ quantidade de movimento do sistema

$E_{sistema}$ energia do sistema

Da equação de conservação de massa vem a equação de continuidade (Fox; McDonald, 1992):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.11)$$

onde:

v_x, v_y, v_z componentes de velocidade nas direções, x, y e z

ρ densidade

x, y, z coordenadas globais cartesianas

t tempo

A taxa de variação da velocidade pode ser substituída pela variação da pressão e a taxa na qual a densidade varia com a pressão, da seguinte forma (Fox; McDonald, 1992):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t}, \text{ onde } P \text{ é a pressão.} \quad (2.12)$$

Em um fluido Newtoniano, a relação entre as tensões e a taxa de deformação (em notação indicial) é linear:

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2.13)$$

onde:

- τ_{ij} tensor de tensões
- u_i velocidades ortogonais ($u_1 = v_x; u_2 = v_y; u_3 = v_z$)
- μ viscosidade dinâmica
- λ segundo coeficiente de viscosidade

O termo final da eq. (2.13) é nulo para um escoamento incompressível e pequeno suficiente para ser desprezado no caso de um escoamento compressível. A eq. (2.13) se transforma na equação de Navier-Stokes.

As equações de quantidade de movimento ficam da seguinte forma (Fox; McDonald, 1992):

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y v_x)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z v_x)}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + R_x + \quad (2.14)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + T_x$$

$$\frac{\partial \rho v_y}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x v_y)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y^2)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z v_y)}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + R_y + \quad (2.15)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + T_y$$

$$\frac{\partial \rho v_z}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x v_z)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y v_z)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z^2)}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + R_z + \quad (2.16)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + T_z$$

onde:

- g_x, g_y, g_z componentes de aceleração provenientes da gravidade
- ρ densidade
- μ_e viscosidade efetiva
- R_x, R_y, R_z resistências distribuídas

T_x, T_y, T_z termos de perdas viscosas

As resistências distribuídas são referentes a quaisquer termos que se queira incluir no sistema e os termos de perdas viscosas são eliminados no caso de um escoamento incompressível, com propriedades constantes.

Para um escoamento laminar, a viscosidade efetiva é simplesmente a viscosidade dinâmica. Para escoamentos turbulentos, ocorre a soma de uma parcela referente à turbulência, μ_t (ANSYS, 2003).

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (2.17)$$

Se as forças inerciais forem consideráveis frente aos efeitos viscosos, o escoamento pode ser turbulento. A turbulência significa que a velocidade a cada ponto do campo de escoamento é flutuante. A velocidade fica expressa então em termos de um valor médio e uma componente variável (Versteeg; Malalasekera, 1995).

$$v_x = \bar{v}_x + v'_x \quad (2.18)$$

onde:

$\bar{v}_x$ valor médio da velocidade na direção x

v'_x valor flutuante da velocidade na direção y

Dos modelos de turbulência disponíveis, o mais comumente difundido e utilizado é o “ $k - \varepsilon$ ”, na literatura (Launder; Spalding, 1974) é possível encontrar detalhes sobre essa formulação.

A solução das equações de turbulência é utilizada para o cálculo da viscosidade efetiva, conforme definido na eq. (2.17).

2.3.1. Condições de Contorno Móveis (Formulação ALE)

Problemas de simulação de fluidos frequentemente envolvem fronteiras móveis. No caso estudado, o atuador dentro do duto tem um movimento oscilatório, que pode ser simulado com o uso de fronteiras móveis. Outros exemplos similares são as superfícies externas ou livres (Lo; Young, 2004). Nesses casos de fronteiras móveis o domínio em estudo se altera com o decorrer do tempo e a malha de elementos finitos deve se alterar de forma a satisfazer esta condição. Para tanto é feito o uso da formulação ALE, “Arbitrary Lagrangian-Eulerian” (Malcevic; Ghatthas, 2002) que se encontra implementada no software ANSYS.

Figura 2.4. Condições de contorno móveis

A fig. 2.4 mostra um corpo rígido em movimento inserido num meio fluido. A formulação “ALE” (Huerta; Liu, 1988) 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.

Devem ser especificados, no caso 2D: os deslocamentos: $U_n = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$ e $U_\tau = \mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\tau}$; e as velocidades: $V_n = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}$ e $V_\tau = \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\tau}$, onde $\mathbf{u}$ e $\mathbf{v}$ são os vetores de deslocamento e velocidade, e $\mathbf{n}$ e $\boldsymbol{\tau}$, os versores nas direções normal e tangente, respectivamente. Conhecendo o comportamento do atuador em função do tempo, escreve-se: $U_x(t); U_y(t)$; $V_x(t)$ e $V_y(t)$. A formulação “ALE” é

responsável por realocar a malha de elementos finitos de forma a satisfazer às condições de contorno impostas a cada instante.

Numa simulação envolvendo malhas móveis, basicamente os termos derivativos em função do tempo precisam ser reescritos em função da movimentação da malha.

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial t} \right|_{malha_fixa} = \left. \frac{\partial \phi}{\partial t} \right|_{malha_móvel} - \mathbf{w} \cdot \nabla \phi \quad (2.19)$$

onde:

ϕ grau de liberdade genérico

$\mathbf{w}$ velocidade da malha móvel

Figura 2.5. Malha de elementos em tempos diferentes

A fig. 2.5 é um exemplo da aplicação dessa formulação, mostrando como a malha é realocada durante a simulação. Trata-se do exemplo de um espelho torsional (ANSYS, 2003): uma placa plana realizando movimento oscilatório sobre uma outra que permanece fixa no espaço. As principais grandezas a serem avaliadas no caso da bomba piezelétrica, vazão e pressão, podem ser avaliadas numa simulação como esta.

A necessidade da utilização deste recurso foi confirmada durante o andamento do projeto, uma vez que foi proposta também uma abordagem com malha fixa como alternativa à necessidade de utilização de malhas móveis, conforme apresentado na seção 3 deste documento.

2.3.2. Discretização das Equações

As equações de quantidade de movimento, energia, transporte e turbulência têm o formato de equação de transporte para um escalar. Deste tipo de equação surgem quatro termos distintos: transiente, convecção, difusão e geração. Considerando uma variável qualquer, ϕ , as equações ficam no seguinte formato (Patankar, 1980; Maliska, 1995):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho C_\phi \phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x C_\phi \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y C_\phi \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z C_\phi \phi) = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) + S_\phi \end{aligned} \quad (2.20)$$

onde:

- C_ϕ transiente e coeficiente de convecção
- Γ_ϕ coeficiente de difusão (viscoso)
- S_ϕ termo de geração (quantidade de movimento)

O processo de discretização consiste em derivar as matrizes para cada elemento e colocá-las na seguinte forma matricial:

$$\left(\left[A_e^{transiente} \right] + \left[A_e^{convecção} \right] + \left[A_e^{difusão} \right] \right) \{ \phi_e \} = \{ S_e^\phi \} \quad (2.21)$$

O termo transiente da matriz pode ser escrito genericamente da seguinte forma (ANSYS, 2003):

$$\left[A_e^{transiente} \right] = \int W^e \frac{\partial (\rho C_\phi \phi)}{\partial t} dV \quad (2.22)$$

Uma aproximação com massas concentradas é usada de tal forma que (ANSYS, 2003):

$$\int W^e \frac{\partial(\rho C_\phi \phi)^e}{\partial t} dV = \frac{\partial(\rho C_\phi \phi)^e}{\partial t} \int W^e dV \quad (2.23)$$

Uma aproximação baseada em diferenças regressivas é utilizada para avaliar o valor do termo derivativo.

Para a discretização do termo de convecção o ANSYS utiliza três aproximações: o MSU (“Monotone Streamline Upwind”), que apresenta precisão de primeira ordem, com tendência a gerar resultados suaves e monotônicos, e o SUPG (“Streamline Upwind / Petro-Galerkin”) e COLG (“Collocated Galerkin”) que são de segunda ordem e tendem a produzir resultados oscilatórios. Essas aproximações geram matrizes com a seguinte formulação, respectivamente (ANSYS, 2003):

$$[A_e^{convecção}] = \left[\frac{\partial(\rho C_\phi v_x \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_\phi v_y \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho C_\phi v_z \phi)}{\partial z} \right] \int W^e dV \quad (2.24)$$

$$[A_e^{convecção}] = \int W^e \left\{ \frac{\partial(\rho v_x C_\phi \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y C_\phi \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z C_\phi \phi)}{\partial z} \right\} dV + \quad (2.25)$$

$$C_{2\tau} \int \frac{zh_a}{2U_{mag}} \left\{ \frac{v_x \partial W^e}{\partial x} + \frac{v_y \partial W^e}{\partial y} + \frac{v_z \partial W^e}{\partial z} \right\} \\ \left\{ \frac{v_x \partial(\rho C_\phi \phi)}{\partial x} + \frac{v_y \partial(\rho C_\phi \phi)}{\partial y} + \frac{v_z \partial(\rho C_\phi \phi)}{\partial z} \right\} dV$$

onde:

$C_{2\tau}$ Coeficiente global

h_a Comprimento do elemento ao longo da direção de convecção

$$U_{mag} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

$$z = \begin{cases} 1 & , 0 \leq Pe \leq 3 \\ Pe/3 & , Pe \geq 3 \end{cases}$$

$$Pe = \frac{\rho C_{\phi} U_{mag} h}{2\Gamma_{\phi}}, \text{ número de Peclet}$$

$$\begin{aligned} [A_e^{convecção}] = & \int W^e \left\{ \frac{\partial(\rho v_x^e C_{\phi} \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y^e C_{\phi} \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z^e C_{\phi} \phi)}{\partial z} \right\} dV + \\ & C_{2\tau} \int \frac{zh}{2U_{mag}^e} \left\{ \frac{v_x^e \partial W^e}{\partial x} + \frac{v_y^e \partial W^e}{\partial y} + \frac{v_z^e \partial W^e}{\partial z} \right\} \\ & \left\{ \frac{v_x^e \partial(\rho C_{\phi} \phi)}{\partial x} + \frac{v_y^e \partial(\rho C_{\phi} \phi)}{\partial y} + \frac{v_z^e \partial(\rho C_{\phi} \phi)}{\partial z} \right\} dV \end{aligned} \quad (2.26)$$

A diferença básica entre as duas últimas aproximações é que o COLG baseia-se nos valores nodais de velocidade.

Em relação ao termo de difusão, conforme ANSYS (2003), é possível desenvolver a equação e chegar à seguinte formulação matricial:

$$[A_e^{difusão}] = \int W_x^e \Gamma_{\phi} W_x^e + W_y^e \Gamma_{\phi} W_y^e + W_z^e \Gamma_{\phi} W_z^e dV \quad (2.27)$$

Finalmente, o termo de geração é o seguinte:

$$S_{\phi}^e = \int W^e S_{\phi} dV \quad (2.28)$$

2.3.3. Algoritmo de Solução

Em determinadas situações, a solução exata das equações não se faz necessária. Foi constatado que, por exemplo, para as equações de quantidade de movimento, o tempo economizado calculando-se apenas soluções aproximadas causa um desvio muito pequeno nas taxas de convergência, segundo ANSYS (2003). Já no

caso da equação de pressão, a solução exata é necessária para garantir a conservação da massa (ANSYS, 2003).

Para lidar com essa variedade de requisitos de precisão, três tipos de algoritmo de solução estão implementados e disponíveis no ANSYS, sendo dois do tipo iterativo e um do tipo direto. O algoritmo de solução direto utilizado é o método direto esparsa Boeing (“Boeing Direct Sparse Method”). O primeiro algoritmo de solução iterativo é um método de varredura conhecido como Algoritmo da Matriz Tri-Diagonal (“Tri-Diagonal Matrix Algorithm” – TDMA) e os demais são semi-diretos incluindo método das direções conjugadas, o método pré-condicionado generalizado dos mínimos resíduos e o método pré-condicionado generalizado do gradiente bi-conjugados (ANSYS, 2003). O TDMA é utilizado para se obter soluções aproximadas e os demais métodos são usados quando se requer soluções exatas. O usuário pode selecionar o método mais apropriado para a solução de cada grau de liberdade do sistema.

Detalhes sobre o algoritmo TDMA podem ser encontrados em Patankar (1980). Por ser um método aproximado, o TDMA não é utilizado até a convergência, sendo que o número de iterações através deste método é um parâmetro de entrada para o mesmo (ANSYS, 2003).

O método das direções conjugadas corresponde ao método dos gradientes conjugados (para sistemas simétricos) e ao método dos resíduos conjugados (para sistemas não-simétricos). Estes são métodos iterativos usados quando se deseja obter uma solução exata para uma determinada equação de interesse. O método dos gradientes conjugados é pré-condicionado com uma decomposição de Choleski incompleta e é utilizado somente para a equação de pressão em escoamentos incompressíveis. O método de solução seguinte (método dos resíduos conjugados) requer a alocação de espaço para uma matriz não-simétrica de coeficientes para as equações de quantidade de movimento e energia. Somente metade desse espaço de armazenamento é utilizado para armazenar matriz simétrica e a outra metade é utilizada para armazenar a decomposição. O método dos resíduos conjugados pode ser usado com ou sem pré-condicionamento, havendo, no segundo caso, uma exigência significativamente menor de memória para armazenamento computacional.

Os critérios de convergência e número máximo de iterações são especificados pelo usuário (ANSYS, 2003).

Maiores informações sobre as direções conjugadas são encontradas em Hestenes; Stiefel (1952).

2.3.4. Algoritmo de Solução Segregado

Cada grau de liberdade é resolvido de maneira seqüencial. As equações são todas acopladas, de tal forma que cada equação é resolvida a partir de valores intermediários dos outros graus de liberdade. O processo de resolver as equações separadamente e atualizar os valores das propriedades é chamada ‘iteração global’. Antes de mostrar a estrutura de cada iteração global é necessário analisar como cada equação é formada.

O processo de solução para as equações foi descrito na seção anterior, exceto pela equação de pressão que é resolvida através do algoritmo segregado de velocidade-pressão. Neste caso, a equação de quantidade de movimento é utilizada para gerar uma expressão para a velocidade em termos dos gradientes de pressão, sendo utilizado na equação de continuidade após sua integração por partes. Este procedimento para solução não-linear utilizado pelo FLOTRAN pertence a uma classe de Método Semi-Implícito para equações acopladas por pressão (“Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations”), ou SIMPLE. Existem dois algoritmos de solução segregados disponíveis, sendo um deles o original SIMPLEF e o outro é o melhorado SIMPLEN.

2.3.5. Linguagem APDL

Para a simulação da bomba piezelétrica foi utilizada a linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language), uma linguagem de programação do ANSYS 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 foi utilizada para dinamizar a criação de modelos computacionais e facilitar a análise de resultados para a bomba piezelétrica.

2.3.6. Tratamento dos dados no ANSYS

De acordo com a teoria de mecânica dos fluidos, a vazão é assim definida:

$$Q = \int_A \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.29)$$

onde:

Q : Vazão

$\mathbf{V}$: Vetor velocidade

$\mathbf{A}$: Vetor normal à área

Como a simulação foi realizada para um problema plano, assumiu-se uma largura constante para o canal e para o cálculo da vazão torna-se, então, necessário realizar a integração da velocidade ao longo da altura do duto.

Os resultados são obtidos a cada passo no tempo, representando, assim, o sistema em um determinado instante de tempo, ou seja, como uma ‘fotografia’ do sistema em um determinado instante.

Figura 2.6. Cálculo da vazão

Para determinar um valor médio de vazão é necessário observar o comportamento dessa velocidade ao longo do tempo, ou seja, é preciso fazer essa integração a cada instante e posteriormente, determinar o valor médio.

Devido à complexidade em realizar todas essas operações dentro do próprio ANSYS, optou-se por escrever um arquivo ASCII contendo os valores de velocidade para, posteriormente, realizar todos os cálculos necessários utilizando o software MATLAB, através de uma função desenvolvida dentro do mesmo. Para geração do arquivo de saída com os resultados é utilizado o comando *VWRITE do ANSYS, conforme descrito no apêndice deste documento.

O arquivo ASCII é escrito num formato de matriz de dimensão MxN, ou seja, com M linhas e N colunas, onde M representa o número de passos no tempo e N, o número de nós na saída do duto.

Fixando um valor de M, ou seja, para um dado instante de tempo, tem-se N valores de velocidade nos nós da seção de saída do duto. É necessário realizar a integração destes valores para a obtenção do valor médio de velocidade.

Para a realização desta integração foi empregado o método dos trapézios.

$$\overline{Q}_t = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{[v_i + v_{i+1}]}{2} A_i \quad (2.30)$$

No entanto, a simulação foi feita considerando apenas o problema bidimensional, desta forma, $A_i = h_i \cdot d_i$, onde h_i é a altura de cada elemento e d_i , é a profundidade, que pode ser considerada constante para o sistema simulado.

Considerando ainda uma discretização constante para a altura, tem-se:

$$\overline{Q}_t = hd \sum_{i=1}^{N-1} \frac{[v_i + v_{i+1}]}{2} \quad (2.31)$$

Expandindo o termo da somatória, tem-se:

$$\sum_{i=1}^{N-1} \frac{v_i + v_{i+1}}{2} = \left[\frac{v_1}{2} + \frac{v_2}{2} \right] + \left[\frac{v_2}{2} + \frac{v_3}{2} \right] + \dots + \left[\frac{v_{N-2}}{2} + \frac{v_{N-1}}{2} \right] + \left[\frac{v_{N-1}}{2} + \frac{v_N}{2} \right] \quad (2.32)$$

Pelas condições de contorno impostas para o problema, tem-se que: $v_1 = 0$ e $v_N = 0$, portanto, não interferem matematicamente nos cálculos. Assim, com a

informação de passo constante na altura, temos: $h_i = \frac{h}{N}$, onde h é a altura do duto.

Lembrando que $A = h.d$, pode-se reescrever a eq.(3.31):

$$\overline{Q}\Big|_t = \frac{A}{N-1} \sum_{i=1}^N v_i \quad (2.33)$$

Ou ainda:

$$\overline{Q}\Big|_t = A \frac{N}{N-1} \bar{v} \quad (2.34)$$

onde: $\bar{v}$ é o valor médio da velocidade na saída da bomba.

Desta forma pode-se obter o valor da velocidade para um determinado instante de tempo. Variando agora o valor de M, variamos o tempo para o qual se calcula o valor da velocidade.

Apesar da maior complexidade é também possível realizar o cálculo de velocidade e vazão dentro do próprio ANSYS de maneira a tornar as rotinas em APDL mais genéricas, facilitando e agilizando as etapas de análise de sensibilidade e otimização onde várias rotinas para diferentes configurações de bomba são gerados.

2.4. Método dos Volumes Finitos (Software “Fluent”)

Outro software considerado para as simulações da bomba piezelétrica foi o “Fluent”. Este software utiliza um método de volumes finitos para a simulação de problemas fluídicos. Esta técnica consiste em:

- Divisão do domínio em volumes de controle discretos usando uma malha computacional;
- Integração das equações que governam o comportamento dos volumes de controle para a montagem de equações algébricas para o cálculo de variáveis desconhecidas do problema, como por exemplo, velocidade, pressão, temperatura e escalares;
- Linearização das equações discretizadas e solução do sistema linear resultante.

O software Fluent foi utilizado somente numa etapa preliminar do projeto. Pelo fato do ANSYS e Fluent terem gerado resultados bastante similares na etapa de aferição da modelagem computacional, foi feita a opção pelo primeiro por ser mais adequado à integração com o software de otimização utilizado, permitir a análise piezelétrica além da experiência de uso do orientador e do grupo de trabalho com o mesmo.

Mais informações sobre as técnicas e métodos empregados pelo software Fluent encontram-se no apêndice deste documento.

2.5. Otimização

Os problemas encontrados na área de Engenharia muitas vezes recaem sobre múltiplas variáveis. Tomando como exemplo um problema estrutural que tenha 10 variáveis como altura, espessura, momento de inércia, material da estrutura, etc., podemos analisar a complexidade de se chegar a valores ótimos para um caso como este.

Considerando, por exemplo, que se deseja otimizar a estrutura de forma a obter maior rigidez e menor peso, uma abordagem intuitiva seria executar várias simulações utilizando elementos finitos de forma a mapear as diversas combinações possíveis dos parâmetros citados. Tomando apenas 3 dos parâmetros e supondo que eles possam tomar 10 valores distintos, teríamos 10^3 análises de MEF, ao custo

computacional de 10 segundos por análise: $T_{total} = 10^3 \cdot 10 = 10^4 s \approx 2,8hs$. Levando agora em consideração todas as 10 variáveis de projeto, temos: $T_{total} = 10^{10} \cdot 10 = 10^{11} s \approx 3200anos$, ou seja, esta abordagem seria inviável (Vanderplaats, 1984)

Para o caso da bomba piezelétrica, podemos definir uma série de variáveis, como frequência de oscilação, altura do duto de escoamento, amplitude de oscilação, comprimento do atuador e área da seção de entrada e saída. Inicialmente podemos considerar apenas os 3 primeiros parâmetros. No caso de uma simulação fluidica e transiente, o tempo computacional de uma única análise pode chegar facilmente à ordem de 10^4s . Como ainda não há um conhecimento mais aprofundado sobre os domínios do problema, pode ser suposto que cada variável assuma até 20 valores pré-estabelecidos. Assim, o tempo total de otimização seria: $T_{total} = 20^3 \cdot 10^4 = 8 \cdot 10^7 \approx 900dias$. Portanto, para análises com alto custo computacional, até mesmo a solução de problemas com um número reduzido de variáveis pode tornar-se inviável.

A solução, então, é partir para uma busca racionalizada através de algoritmos numéricos de otimização capazes de reduzir drasticamente o tempo para se encontrar uma solução ótima.

Na formulação de um problema de otimização estão presentes os seguintes conceitos: variáveis de projeto, função objetivo, restrições e domínio viável.

São definidas como variáveis de projeto os parâmetros do problema que podem ser alterados para otimizar o sistema. Neste caso, os principais parâmetros que devem influenciar o problema podem ser observados na figura a seguir:

Figura 2.7. Parâmetros da bomba

Onde: h : altura do duto; f : frequência de oscilação; A_{max} : amplitude máxima de oscilação.

Para a formulação de um problema de otimização, além das variáveis de projeto, precisamos ter definidos: a função objetivo e as restrições. A função objetivo é responsável por quantificar o resultado que se deseja otimizar. Para o problema da bomba, a função objetivo poderia ser “maximizar o fluxo médio no canal (Q)”. As restrições correspondem às limitações impostas para se obter o resultado desejado. No caso da bomba, tem-se que a amplitude de oscilação não pode exceder a altura do duto no qual o atuador está inserido.

Tendo definido variáveis de projeto, função objetivo e restrições, o problema de otimização (Haftka; Gürda; Kamat, 1990; Vanderplaats, 1984) da bomba piezelétrica é formulado da seguinte forma:

$$\begin{array}{ll} \text{Maximizar } Q(f,h,A) \\ f,h,A \\ \text{tal que:} & f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \\ & h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ & A_{\min} \leq A \leq h \end{array}$$

Este problema de otimização será resolvido utilizando o software “Altair Hyperstudy” descrito a seguir.

2.6. “Altair Hyperstudy” (Software de Otimização)

Para a etapa de otimização da bomba piezelétrica é utilizado o software Altair Hyperstudy, capaz de realizar estudos problemas complexos bem como a otimização paramétrica para um dado sistema. O software é capaz de se comunicar com diversos softwares de simulação, dentre eles o “ANSYS”, que está sendo utilizado nas simulações dentro deste projeto.

A integração dos softwares de otimização e de elementos finitos se dá da seguinte forma:

Figura 2.8. Interação do software de otimização com o de elementos finitos

Primeiramente define-se no software o problema de otimização, determinando-se as variáveis de projeto, a função objetivo e as restrições. Em seguida, o software gera um arquivo de entrada para o ANSYS (software de elementos finitos), com valores iniciais definidos pelo usuário. A simulação numérica então é realizada e um arquivo de saída com os resultados da simulação é gerado no final. O otimizador recebe então este arquivo e interpreta o seu resultado.

Dá-se então início à otimização propriamente dita, esquematizada na fig. 2.9, os valores de entrada são alterados automaticamente pelo otimizador e após a simulação ele avalia se o desempenho geral do sistema melhorou ou piorou. Caso tenha piorado, os resultados são descartados e uma nova combinação de parâmetros é testada. Caso tenha melhorado, o software verifica em seu critério de convergência se aquele valor já pode ser considerado ótimo. Em caso negativo, uma nova combinação será escolhida de acordo com o algoritmo de otimização implementado. Em caso positivo, a otimização é finalizada e os parâmetros ótimos do sistema são entregues.

Figura 2.9. Funcionamento do software de otimização

2.6.1. Métodos de Otimização Empregados

Dois algoritmos principais de otimização encontram-se implementados no software (Altair, 2003), o primeiro, um método de superfícies de resposta sequenciais (Myers; Montgomery, 1995) e o método das direções viáveis (Haftka; Gürdal; Kamat, 1990; Vanderplaats, 1984).

No primeiro método, a função objetivo e as restrições são aproximadas em função das variáveis de projeto (‘ x_i ’) através de um polinômio de segunda-ordem no formato:

$$\Psi_i(\mathbf{x}) \approx \Psi_i^{\wedge}(\mathbf{x}) = A_{i0} + \sum_{j=1}^m A_{ij}x_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m A_{ijk}x_jx_k \quad (2.35)$$

com:

$$i = 1, 2, \dots, NCON + 1$$

$$j, k = 1, 2, \dots, NDV$$

onde:

$NCON$ número de restrições

NDV número de variáveis de projeto

A_{i0}, A_{ij}, A_{ijk} coeficientes polinomiais

Figura 2.10. Superfícies de resposta (Altair, 2003)

Os coeficientes polinomiais são determinados utilizando uma aproximação por mínimos quadrados baseados nas iterações anteriores. O algoritmo busca aproximar a função estudada por uma série de polinômios, tal que os pontos de mínimo converjam para o ponto desejado (fig. 2.10). O método encontrado no software também faz uso de limites móveis, aumentando a robustez do algoritmo de otimização. Os limites móveis consistem basicamente na definição de limites máximos e mínimos dentro do qual as aproximações feitas através de polinômios podem ser consideradas válidas, representando o comportamento da função objetivo.

Em relação ao método das direções viáveis, trata-se de um dos métodos mais clássicos para a solução de problemas de otimização com restrições (Haftka; Gürdal; Kamat, 1990; Vanderplaats, 1984). O método das direções viáveis é um método direto, ou seja, primeiramente a rotina de otimização é executada, para em seguida serem verificadas as violações às restrições impostas.

Essencialmente esse método sempre procura caminhar numa direção útil s (que melhora a função objetivo f) e viável (respeita as restrições g_j) como ilustrado na fig. 2.11.

Figura 2.11. Seleção das direções de busca usando o método das direções viáveis

Uma direção é viável se satisfaz:

$$s^T \nabla g_j > 0 \quad (2.36)$$

e uma direção é útil se satisfaz:

$$s^T \nabla f < 0 \quad (2.37)$$

onde:

s direção

∇g_j gradiente das restrições

∇f gradiente da função objetivo

Assim a direção s é obtida através da solução do problema de otimização de programação linear:

$$\begin{array}{ll} \text{Min} & \beta \\ \text{tal que} & -s^T \nabla g_j + \theta_j \beta \leq 0 \\ & s^T \nabla f + \beta \leq 0 \quad \theta_j \geq 0 \\ & |s_i| \leq 1 \end{array}$$

Os coeficientes θ_j determinam o quanto $\mathbf{x}$ irá se afastar da fronteira das restrições. Um valor de $\theta_j = 0$ resultará num movimento tangente à fronteira das restrições, sendo apropriado para restrições lineares. Um valor grande de θ_j resultará num grande ângulo entre a fronteira da restrição e a direção $\mathbf{s}$, sendo apropriado para uma restrição altamente não-linear.

O software permite ainda que outros métodos de otimização sejam empregados, ou seja, permite que o usuário implemente um método próprio e o utilize em conjunto com o programa.

3. MODELOS PROPOSTOS

Nesta seção será discutida a modelagem da bomba piezelétrica.

Olhando a fig. 3.1, a seguir, vê-se um esquema de montagem para a bomba piezelétrica. Uma possível abordagem seria realizar uma modelagem tridimensional para o dispositivo, modelando todo o volume de fluido e o atuador se movimentando dentro deste volume.

No entanto, analisando mais cuidadosamente o dispositivo, nota-se que, com exceção da região em torno das bordas do atuador, o comportamento do mesmo é bastante similar ao longo de sua largura. Assim, fez-se uma opção por utilizar modelos bidimensionais para o estudo desta bomba, como forma de simplificar o problema e também reduzir consideravelmente seu custo computacional.

Figura 3.1. Esquema da bomba piezelétrica

Foi então, estabelecida uma hierarquia de modelos para a simulação da bomba piezelétrica, partindo de modelos mais simples utilizando malhas fixas, até

modelos mais complexos utilizando os recursos de malhas móveis nos softwares de simulação.

O primeiro modelo proposto consiste na utilização de uma malha fixa e aplicação de condições de contorno de velocidade apropriadas na fronteira correspondente ao atuador. A figura a seguir retrata esse modelo.

Figura 3.2. Condições de contorno para malha fixa (primeiro modelo)

O segundo modelo é o que aproxima o comportamento do bilaminar por um corpo rígido articulado (fig. 3.3). Para pequenas amplitudes de oscilação, os resultados obtidos devem representar de maneira satisfatória o problema analisado.

Figura 3.3. Atuador modelado como corpo rígido articulado

O terceiro modelo proposto para análise da bomba piezelétrica, visto na fig. 3.4, está baseado num corpo flexível que representa de maneira mais realista o atuador piezelétrico bilaminar.

Figura 3.4. Atuador modelado como corpo elástico

Nos modelos apresentados na fig. 3.3 e fig. 3.4, o que é feito basicamente é o estudo do perfil de deformações causado pelo atuador e a imposição do mesmo no meio fluido, de forma a verificar o escoamento sendo gerado pela bomba. A formulação “ALE” é utilizada nestes dois casos, sendo o perfil de deformações do atuador aplicado como uma condição de contorno móvel no sistema. O modelo de corpo rígido articulado (fig. 3.3) foi utilizado apenas em simulações preliminares para familiarização com o recurso de malha móvel disponível no ANSYS. Os modelos com malha fixa, onde são impostas apenas as condições de contorno de velocidade do atuador são comparados com os modelos que utilizam malha móvel, de forma a se verificar a real necessidade da utilização deste recurso dos softwares, que pode levar a distorções na malha, comprometendo os resultados.

Esperava-se que o primeiro modelo de malha fixa (fig. 3.2) gerasse resultados semelhantes aos modelos de malha móvel (fig. 3.4 e fig. 3.5) para o caso de pequenos deslocamentos do atuador, o que não deveria se repetir no caso de deslocamentos maiores, uma vez que este primeiro modelo não leva em conta a deformação do atuador em si.

Posteriormente um estudo computacional mais aprofundado do atuador bilaminar piezelétrico foi considerado. Inicialmente considerou-se somente o atuador agindo no vácuo e, em seguida, o meio fluido no qual o mesmo encontra-se inserido (fig. 3.5) através do elemento FLUID29, capaz de realizar a interação fluido-estrutura e que possui graus de liberdade de pressão e deslocamento. Esta abordagem para o atuador bilaminar piezelétrico permite a análise de seu comportamento quando inserido em meio fluido (que é diferente do comportamento em vácuo), sendo possível extrair informações a respeito de seus modos e frequências de ressonância.

Figura 3.5. Atuador piezelétrico bilaminar inserido no meio fluido

4. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

4.1. Aferição da Modelagem Computacional

Com o objetivo de verificar a adequação das técnicas de modelagem utilizadas neste projeto, foi realizada inicialmente uma comparação entre um trabalho proposto na literatura (Açikalin; Raman; Garimella, 2003), onde os autores apresentam uma comparação entre resultados experimentais e numéricos para um ventilador piezelétrico (“piezoelectric fan”), um dispositivo construtivamente similar à bomba piezelétrica que, no entanto, utiliza ar como fluido de trabalho. Os resultados foram reproduzidos com os softwares Fluent e ANSYS utilizando a mesma abordagem posteriormente empregada na modelagem da bomba piezelétrica como forma de verificar a validade dos resultados gerados pelos softwares para um caso bastante similar ao deste projeto

Os autores Açikalin; Raman; Garimella (2003) apresentam uma expressão analítica para um atuador piezelétrico com a seguinte geometria (fig. 4.1).

Figura 4.1. Montagem experimental do ventilador piezelétrico

A expressão da deformação da lâmina no dispositivo é dada por Açikalin; Raman; Garimella (2003):

$$U_y(x) = a_1 e^{-b_1 x} + a_2 e^{b_1 x} + a_3 \cos(b_1 x) + a_4 \sin(b_1 x) \quad 0 \leq x \leq L_1 \quad (4.1)$$

$$a_5 \cos(b_2 x) + a_6 \cosh(b_2 x) + a_7 \sin(b_2 x) + a_8 \sinh(b_2 x) \quad L_1 \leq x \leq L_2 \quad (4.2)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 L_1 &= 0,029 & b_1 &= 32,8682 & a_1 &= 0,072861 & a_5 &= -0,4742 \\
 L_2 &= 0,065 & b_2 &= 49,4542 & a_2 &= 0,015744 & a_6 &= 1,7902 \\
 & & & & a_3 &= -0,0886 & a_7 &= -0,3694 \\
 & & & & a_4 &= 0,05711 & a_8 &= -1,75577
 \end{aligned}$$

A expressão do deslocamento da lâmina em função do tempo fica assim expressa:

$$U_y(x,t) = A \left[a_1 e^{-b_1 x} + a_2 e^{b_1 x} + a_3 \cos(b_1 x) + a_4 \sin(b_1 x) \right] \sin(\omega t) \quad 0 \leq x \leq L_1 \quad (4.3)$$

$$A \left[\begin{array}{l} a_5 \cos(b_2 x) + a_6 \cosh(b_2 x) + a_7 \sin(b_2 x) + \\ a_8 \sinh(b_2 x) \end{array} \right] \sin(\omega t) \quad L_1 \leq x \leq L_2 \quad (4.4)$$

com:

$$A = 0,0008[m]$$

$$\omega = 120\pi[rad / s]$$

Para a aferição da técnica de modelagem, reproduziram-se os resultados da literatura através dos softwares mencionados. Para tanto, foram montados modelos representando o sistema de Açıkalın; Raman; Garimella (2003), mostrado na figura abaixo:

Figura 4.2. Sistema para simulação do piezofan.

O sistema representa um “meio-espaço” onde o “piezofan” atua. Na fig. 4.2 é possível ver que o domínio considerado leva em conta somente a região superior em torno do atuador piezelétrico. Maiores detalhes podem ser encontrados em Açikalin; Raman; Garimella (2003). O fluido no meio considerado é o ar e as dimensões podem ser observadas na fig. 4.2.

As propriedades do fluido utilizados na simulação foram as seguintes:

$$\rho: 1,225 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu: 0,0000179 \frac{N.s}{m^2}, \text{ (Fox; McDonald, 1992)}$$

sendo:

ρ : densidade

μ : viscosidade absoluta

Na fig. 4.3, pode se ver um detalhe da malha utilizado no software ANSYS de elementos finitos, com uma maior discretização na região próxima ao atuador, área na qual há maior interesse em se averiguar os resultados. A malha utilizada é composta por 29.000 elementos e foram utilizados 6.000 passos no tempo para uma simulação de 0,20s. A amplitude máxima de oscilação na extremidade do atuador foi de 0,8mm a uma frequência de 60Hz. Assim, a simulação representou cerca de 12 ciclos de oscilação para o atuador com cada ciclo sendo discretizado em cerca de 50 passos. Para a simulação do movimento do atuador foi utilizado o recurso de malha móvel. O código-fonte em “APDL” encontra-se em anexo a este documento.

Figura 4.3. Malha utilizada no ANSYS.

A seguir, na fig. 4.4, podem ser observadas as linhas de fluxo geradas a partir do software ANSYS.

Figura 4.4. Linhas de fluxo obtidas no ANSYS.

A seguir, na fig. 4.5, vê-se um detalhe da malha utilizada para simulação no software “Fluent”, novamente com uma maior discretização na região próxima ao atuador. A malha completa é composta de 27.000 células e foram utilizados 7.000 passos no tempo, sendo cada passo de 0,00003s, totalizando 0,21s. Novamente, a

amplitude máxima na extremidade do atuador foi de 0,8mm a uma frequência de 60Hz. A simulação neste caso representou 12,6 ciclos de oscilação com cada ciclo sendo discretizado em cerca de 55 passos no tempo.

Figura 4.5. Malha utilizada no Fluent.

A seguir, na fig. 4.6, podem ser vistas as linhas de fluxo geradas através do software “Fluent”.

Figura 4.6. Linhas de fluxo obtidas no Fluent.

Foram obtidos resultados de primeira ordem para o problema tanto utilizando o ANSYS como o Fluent.

As linhas de fluxo encontradas através dos softwares utilizados conferem com os resultados disponíveis na literatura para este problema.

Além destes resultados qualitativos foi também feita uma análise quantitativa entre os resultados obtidos através do software e os encontrados na literatura. Conforme mostrado em Açıkalın; Raman; Garimella (2003), foram extraídos dados relativos às componentes 'x' e 'y' em regiões próximas ao atuador piezoelétrico.

Dos modelos simulados através do uso dos softwares "ANSYS" e "Fluent" também foram medidas as velocidades nas mesmas locações de Açıkalın; Raman; Garimella (2003). Os resultados obtidos são mostrados a seguir:

Figura 4.7. Velocidades 'x' e 'y' (ANSYS)

Figura 4.8. Velocidades 'x' e 'y' (Fluent)

Nas figuras, fig. 4.7 e fig. 4.8, respectivamente, são apresentados os resultados obtidos através dos softwares “ANSYS” e “Fluent”, respectivamente.

Nota-se uma grande concordância entre os resultados da literatura (Açikalin; Raman; Garimella, 2003) e os produzidos por ambos softwares, mostrando que ambos são capazes de simular este tipo de sistema, similar à bomba piezelétrica.

É importante ressaltar que Açikalin; Raman; Garimella (2003) apresentam também resultados de segunda ordem, comparando resultados numéricos com resultados de visualização de escoamento experimentais. No entanto, tais resultados são provenientes de um fenômeno denominado ‘escoamento acústico’ (“acoustic streaming”) que deve ocorrer prioritariamente em sistemas com frequências elevadas

e baixas viscosidades. No entanto, os softwares utilizados não são capazes de reproduzir este tipo de fenômeno em simulações transientes. Esse fato, no entanto, foi de pouca relevância no andamento do projeto, uma vez que, embora a frequência de oscilação do atuador seja da mesma ordem do sistema de Açikalin; Raman; Garimella (2003), o fluido de trabalho no caso da bomba piezelétrica é a água, com uma viscosidade elevada, ao contrário do ar, que possui baixa viscosidade.

Maiores detalhes sobre o fenômeno de escoamento acústico podem ser encontrados em Riley (2001), Nyborg (1953), Nyborg (1958), Wan; Kuznetsov (2003a), Wan; Kuznetsov (2003b), Loh et al. (2002); Westervelt (1953). Holtsmark et al. (1954), Raney; Corelli; Westervelt (1954), Oestreicher (1951),

4.2. Resultados Preliminares da Bomba Piezelétrica

4.2.1. Modelagem do Atuador

O perfil de deslocamentos considerado inicialmente para a bomba piezelétrica é derivado do perfil dado por Açikalin; Raman; Garimella (2003). Ajustando a expressão às medidas do atuador bilaminar disponível para testes, chegou-se à seguinte expressão:

$$UY(x) = A \cdot \begin{bmatrix} 1.13488e^{-24.4404x} + 0.24523e^{24.4404x} - 1.3800 \cos(24.4404x) \\ + 0.88955 \sin(24.4404x) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

onde:

A amplitude de oscilação

Considerando uma amplitude de oscilação unitária, pode-se observar o padrão de deslocamentos do atuador conforme a fig. 4.9.

Figura 4.9. Perfil de deslocamentos do atuador (normalizado)

Para obter o deslocamento em função do tempo, basta multiplicar a expressão por uma função senoidal com a frequência desejada:

$$UY(x, t) = UY(x) \sin(\omega t) \quad (4.6)$$

Inicialmente foram considerados apenas os deslocamentos e velocidades no atuador na direção ‘y’, ou seja, os deslocamentos transversais do atuador, desconsiderando os deslocamentos longitudinais, Δx , que devem ser pequenos e desprezíveis para pequenas amplitudes de oscilação.

Figura 4.10. Deslocamentos transversais

No entanto, embora os deslocamentos sejam desprezíveis, o mesmo não se pode dizer da velocidade, pois de acordo com a frequência, a mesma pode atingir valores consideráveis.

Como se sabe, a única componente de velocidade no fluido devido à ação do atuador deve ser normal à sua superfície, de tal forma que o fluido obedeça ao princípio da aderência completa.

Do modelo inicial é possível obter a componente 'y' da velocidade. Através de relações geométricas é possível obter a componente longitudinal 'x' correspondente.

Figura 4.11. Relações geométricas

Sendo:

$$v_y(x,t) = v_n(x,t) \cos(\theta) \quad (4.7)$$

e:

$$v_x(x,t) = -v_n(x,t) \sin(\theta) \quad (4.8)$$

pode-se escrever $v_x(x,t)$ em função de $v_y(x,t)$:

$$v_x(x,t) = -v_y(x,t) \tan(\theta) \quad (4.9)$$

ou ainda:

$$v_x(x,t) = -v_y(x,t) \frac{du_y(x,t)}{dx} \quad (4.10)$$

A partir desta formulação, os vetores de velocidade ficam mostrados conforme a fig. 4.12.

Figura 4.12. Vetores de velocidade no atuador

4.2.2. Malha Fixa x Malha Móvel

As primeiras simulações realizadas corresponderam aos modelos de malha fixa e malha móvel anteriormente citados (num primeiro instante, a componente 'x' de velocidade foi ignorado).

Nesta etapa do projeto foi considerado o sistema representado na fig. 3.4 com os seguintes parâmetros:

A: 200μm

f: 370Hz

h: 4mm

Foi considerada também uma seção de saída de dimensões 4mm x 20mm (para cálculo da vazão). A malha utilizada para essas primeiras simulações é mostrada na figura a seguir.

Figura 4.13. Malha de elementos finitos

Na fig. 4.13a é possível ver a malha de elementos e as condições de contorno nela representadas, sendo que as partes superior e inferior correspondem às paredes do duto da bomba, com as velocidades e deslocamentos nulos; nas regiões à direita e esquerda do modelo têm-se as condições de contorno de pressão, que foi considerada nula neste momento tanto na entrada quanto na saída; e na região interna, notam-se as condições de contorno do atuador utilizado, velocidades e deslocamentos (no caso da malha móvel). Na fig. 4.13b é mostrada somente a malha utilizada nas simulações, sendo que a mesma contém 4.698 elementos triangulares (a mesma malha foi utilizada para o caso da malha fixa quanto o da malha móvel) com uma maior densidade na região próxima ao atuador. A escolha por elementos triangulares deve-se ao fato de que, desta forma, é possível variar a densidade de elementos em determinadas regiões sem causar grandes distorções nos mesmos.

As propriedades do fluido utilizados na simulação foram as seguintes:

$$\rho: 1000 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu: 0,001 \frac{N.s}{m^2}, \text{ (Fox; McDonald, 1992)}$$

Foi considerado um regime turbulento transiente (utilizando um modelo k-ε), procurando observar a vazão sendo gerada pela bomba até que a mesma atingisse um regime estacionário. Embora as velocidades envolvidas e mesmo os resultados de fluxo gerado pela bomba sejam pequenas, caracterizando um regime laminar, foi feita a opção de se fazer a simulação considerando um regime turbulento, uma vez que, localmente e principalmente na região próxima ao atuador, pode haver a ocorrência de turbulência dada as maiores velocidades encontradas. Nas simulações foram considerados 0.5s, correspondendo a 185 ciclos de oscilação do atuador (com uma discretização temporal de 50.000 passos).

Em relação aos parâmetros do solver, foi utilizada a seguinte configuração: TDMA para os graus de liberdade de velocidade e turbulência; método pré-condicionado conjugado residual para o grau de liberdade relativo à pressão.

Os resultados de vazão para estes modelos estão mostrados a seguir:

Figura 4.14. Vazão para os modelos de malha móvel (a) e malha fixa (b)

O modelo com malha móvel (fig. 4.14a) parece caminhar para uma vazão de 18cc/min, sendo que o sistema ainda não parece ter entrado totalmente num regime estacionário, embora seja possível notar a sua tendência. No sistema modelado com malha fixa (fig. 4.14b) a vazão parece estabilizar num valor em torno de 1,1cc/min, sendo que neste caso, o valor já parece ser constante. Embora a oscilação em torno de um valor médio pareça ser maior no caso da malha fixa, o mesmo não é verdade, trata-se apenas de uma questão de escala, através da observação de um detalhe do gráfico da fig. 4.14a, isto pode ser constatado (fig. 4.15), em ambos os casos, a amplitude desta oscilação é de cerca de 0,15cc/min.

Figura 4.15. Detalhe do gráfico de vazão

Como o único fator que diferenciou uma simulação da outra foi a utilização de um modelo de malha móvel ou malha fixa, conclui-se que a mesma tem um efeito bastante expressivo nos resultados obtidos.

A hipótese levantada é de que o modelo de malha fixa não é capaz de reproduzir adequadamente os efeitos de pressão causados no fluido pela movimentação do atuador.

Figura 4.16. Pressões no sistema com malha móvel (a) e malha fixa (b)

Na fig. 4.16 estão representadas as pressões no sistema para os casos simulados utilizando malha móvel e malha fixa. Embora aparentemente semelhantes, os valores das pressões observados nos casos diferem quantitativamente, mostrando que, realmente, as condições relativas à pressão no sistema estão diferindo, ou seja, não foi possível reproduzir as condições de contorno de pressão utilizando a malha fixa.

4.2.3. Influência da Componente 'x' de velocidade

A modelagem inicialmente feita não levou em conta a componente de velocidade 'x' por fins de simplicidade na modelagem. No entanto, por ser uma componente agindo exatamente na direção em que se observa o fluxo, decidiu-se averiguar a relevância desta componente. Assim, de acordo com a modelagem

discutida anteriormente, a componente 'x' de velocidade ('vx') foi considerada nas simulações.

A mesma malha e os mesmos parâmetros mostrados no item anterior foram considerados, sendo a única diferença entre os modelos a consideração desta componente de velocidade. Neste momento, ainda, os modelos de malha móvel e fixa foram considerados.

Os resultados podem ser observados a seguir:

Figura 4.17. Vazão para os modelos de malha móvel (a) e fixa (b), considerando 'vx'

Comparando os gráficos da fig. 4.14 com os gráficos da fig. 4.17, nota-se uma pequena diferença entre os valores das vazões médias obtidas, sendo ligeiramente superior no caso em que 'vx' foi considerado, o que pode ser observado com maior clareza no caso da malha fixa, uma vez que o valor médio já convergiu. Isto demonstra que, embora tenha influência no sistema, a componente 'x' de velocidade não é mandatória na geração de fluxo de fluido através deste fenômeno, podendo, então ser desprezada sem prejuízo aos resultados gerados.

4.2.4. Dados Experimentais

Paralelamente às simulações computacionais da bomba piezelétrica, a investigação através da construção e caracterização de protótipos vem sendo realizada por outro aluno de mestrado (Pires; Nakasone; Silva, 2004; Pires et al,

2005; Pires et al, 2006; Nakasone; Pires; Silva, 2004; Nakasone et al, 2005). Desta forma, a comparação dos dados computacionais com os resultados experimentais obtidos foi viabilizada.

Primeiramente, é importante notar que a construção de um protótipo tal como proposto na idéia básica da bomba, ilustrada na Fig. 3.4, não é viável, uma vez que nesta concepção, a fixação do atuador não foi considerada adequadamente. Assim sendo, o protótipo construído para testes e caracterizado possui a seguinte geometria:

Figura 4.18. Geometria do protótipo caracterizado

onde:

A: 150 μ m, 200 μ m e 250 μ m (pico-a-pico)

f: 370Hz

h: 4mm

$L_{entrada}$: 1mm

$L_{atuador}$: 39mm

L_{saida} : 12mm

Como pode ser notado, a fixação do atuador foi feita na parte traseira do corpo da bomba piezelétrica, a entrada do fluido que deveria ocorrer por essa região, ocorre agora através de aberturas na parte superior e inferior da bomba, como pode ser visto na fig. 4.18.

Para o protótipo deste modelo, operando em circuito fechado (diferencial nulo de pressão entre a entrada e a saída), uma vazão de 12,4cc/min foi medida experimentalmente.

Este protótipo foi também modelado para simulação utilizando o software ANSYS de elementos finitos. A malha de elementos utilizada é mostrada a seguir:

Figura 4.19. Malha para simulação da bomba piezelétrica

A malha utilizada contém 3.154 elementos triangulares, como pode ser observado na fig. 4.19b. Na fig. 4.19a, estão representadas as condições de contorno aplicadas no sistema. Para esta simulação foi utilizado o recurso de malha móvel, uma vez que a malha fixa não se mostrou capaz de representar adequadamente as condições de pressão.

Novamente, foram considerados 0,5s na simulação, discretizado em 50.000 passos. Uma observação importante deve ser feita em relação às amplitudes de deslocamento descritas, pois até o presente momento, não foi realizada nenhum tipo de medição de deslocamento do atuador em meio aquoso. As medidas realizadas foram com o atuador se movimentando ao ar livre, onde o mesmo apresentou deslocamentos em torno de 1,0mm a 1,5mm (pico-a-pico). Assim, considerou-se uma redução na água da ordem de 5 a 10 vezes, obtendo assim os valores de 150 μ m, 200 μ m e 250 μ m.

Os resultados obtidos através dessas simulações podem ser vistos a seguir:

Figura 4.20. Vazão média para uma amplitude de 150 μ m

Figura 4.21. Vazão média para uma amplitude de 200 μ m

Figura 4.22. Vazão média para uma frequência de 250μm

Como pode ser visto através de fig. 4.20, fig. 4.21 e fig. 4.22, foram atingidos valores médios de vazão de 12,0cc/min, 16,4cc/min e 20,8cc/min para as amplitudes de 150μm, 200μm e 250μm, respectivamente.

Embora o resultado obtido para uma amplitude de deslocamento de 150μm apresente grande proximidade com o resultado experimental obtido, não é correto ainda afirmar que a amplitude de deslocamento seja realmente essa. Na seção seguinte o atuador bilaminar piezelétrico será estudado e analisado, de forma a se obter informações a respeito de suas frequências de ressonância, modos de vibrar, impedância elétrica e comportamento quando submerso em meio fluido.

4.3. Atuador Piezelétrico Bilaminar

Foi realizado um estudo do atuador piezelétrico bilaminar através de simulações através do software ANSYS. Para tanto foi utilizado o elemento PLANE13, capaz de reproduzir tanto efeitos estruturais quanto piezelétricos, considerando a geometria e dimensões mostradas na fig. 4.23.

Figura 4.23. Dimensões do atuador piezelétrico

onde: $L_{total} = 40\text{mm}$; $L_{PZT} = 35\text{mm}$; $L_{engaste} = 1\text{mm}$; $e_{PZT} = 0,2\text{mm}$; $e_{metal} = 0,2\text{mm}$.

Foram consideradas as propriedades de uma cerâmica do tipo PZT-5A, cujas propriedades são dadas a seguir:

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & e_{31} & 0 \\ 0 & e_{33} & 0 \\ 0 & e_{31} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e_{15} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -5,4 & 0 \\ 0 & 15,8 & 0 \\ 0 & -5,4 & 0 \\ 12,3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12,3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C.m^{-2}] \quad (4.11)$$

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{13} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & c_{33} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{44} & 0 & 0 \\ & & & & c_{44} & 0 \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12,5 & 7,52 & 7,54 & 0 & 0 & 0 \\ & 11,1 & 7,52 & 0 & 0 & 0 \\ & & 12,5 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2,11 & 0 & 0 \\ & & & & 2,11 & 0 \\ & & & & & 2,26 \end{bmatrix} [10^{10} N.m^{-2}] \quad (4.12)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_D^S = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{D_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_{D_{11}} & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_{D_{33}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,1066 & 0 & 0 \\ 0 & 7,3455 & 0 \\ 0 & 0 & 8,1066 \end{bmatrix} [10^{-9} m.F^{-1}] \quad (4.13)$$

Para o metal foram consideradas as propriedades do cobre ($E=110\text{GPa}$; $\rho=8970\text{kg/m}^3$).

A tensão foi aplicada da seguinte forma:

Figura 4.24. Aplicação de cargas no bilaminar

Foram aplicadas as seguintes tensões no atuador bilaminar piezelétrico: $V_1=0\text{V}$ e $V_2=60\text{V}$.

A primeira análise realizada foi a estática, utilizando a seguinte malha de elementos finitos (fig. 4.25):

Figura 4.25. Malha de elementos para o atuador bilaminar piezelétrico

A malha apresentada possui cerca de 14.000 elementos, sendo que na fig. 4.25 é apresentado também um detalhe da região em que a cerâmica piezelétrica passa a cobrir o corpo do atuador.

Figura 4.26. Deslocamentos verticais do atuador

Para a carga aplicada o deslocamento máximo observado no atuador foi de 0,168mm.

Para este mesmo atuador foi realizada a análise modal, de forma a se obter as frequências de ressonância e os três primeiros modos de vibrar do atuador. Na simulação, para a obtenção da ressonância do sistema, os eletrodos foram colocados em curto-circuito (Silva, 1993), assim, foi considerado $V_1=V_2=0V$. Os resultados foram as frequências de: 76,5Hz; 963,5Hz e 2881,0Hz. Os modos de vibrar encontram-se ilustrados nas figuras seguintes:

Figura 4.27. Primeiro modo de vibrar ($f=76,5\text{Hz}$)

Figura 4.28. Segundo modo de vibrar ($f=963,5\text{Hz}$)

Figura 4.29. Terceiro modo de vibrar ($f=2881,0\text{Hz}$)

Foi constatada, no entanto, a inviabilidade de uso do atuador piezelétrico bilaminar da maneira que ele se encontrava, sem nenhum tipo de revestimento, pois inserindo o mesmo em água e aplicando tensão, notou-se a formação de bolhas que

afetaram o desempenho da mesma. A causa do problema foi a eletrólise causada pela água. Assim, o atuador recebeu uma camada de revestimento plástico de 0,1mm. Para analisar o efeito do mesmo no funcionamento do atuador, as mesmas simulações foram novamente realizadas. Para efeitos de simulação foram consideradas as propriedades do Nylon 6,6 ($E=3,8\text{GPa}$; $\rho=1140\text{kg/m}^3$).

A malha utilizada para as simulações está representada na fig. 4.30.

Figura 4.30. Malha de elementos para o atuador bilaminar piezelétrico com revestimento

Esta malha possui cerca de 19.000 elementos, sendo que na fig. 4.30 é possível notar o detalhe da região em que há presença de cerâmica e, agora, também o revestimento plástico.

Com o atuador revestido, a amplitude de deslocamento obtida para a mesma condição de carga aplicada foi de 0,157mm (fig. 4.31), havendo uma queda de cerca de 6,5% na amplitude de deslocamento.

Figura 4.31. Deslocamentos verticais do atuador bilaminar revestido

Para a análise modal foram obtidas novas frequências de ressonância nos valores: 74,96Hz; 972,8Hz; 2900,0Hz com modos de vibrar similares aos mostrados

em fig. 4.27, fig. 4.28 e fig. 4.29. Nota-se que o valor da primeira frequência de ressonância foi reduzido, conforme esperado, uma vez que o plástico inserido acrescenta massa ao sistema e aumenta relativamente pouco a rigidez. Já para o segundo e terceiro modo, foi observado um aumento do valor da frequência, que deve ter sido causado pelo fato do atuador ter se tornado mais rígido para estes modos de vibrar.

As frequências de ressonância aqui apresentadas levam em consideração somente o atuador bilaminar piezelétrico, sem quaisquer considerações em relação ao meio em que o mesmo encontra-se inserido, e mesmo em relação à montagem da bomba. Por esses motivos, as frequências em torno de $\sim 75\text{Hz}$ obtidas não correspondem à frequência de 370Hz utilizada para excitação do atuador piezelétrico nos protótipos e também utilizada nas simulações envolvendo fluidos. As frequências de ressonância utilizadas nos testes experimentais com o protótipo da bomba piezelétrica são obtidas através da caracterização do atuador através da análise de impedância elétrica com o impedômetro fasorial disponível no departamento.

4.4. Atuador em Meio Fluido

A fim de melhor estudar o comportamento do atuador bilaminar piezelétrico em meio fluido uma nova série de simulações foram realizadas.

Foi utilizado o elemento FLUID29 do software ANSYS, bidimensional e com graus de liberdade de deslocamento em 'x' e 'y' além de pressão e que é capaz de realizar a interação fluido-estrutura. Este elemento é utilizado essencialmente em análises acústicas, mas, em conjunto com a modelagem piezelétrica, permite o estudo das características elétricas do atuador (impedância elétrica) e também a determinação das frequências de ressonância e modos de vibrar quando o mesmo encontra-se inserido em meio fluido, ou seja, representando a condição de operação da bomba piezelétrica.

Para esta análise foi montado um modelo considerando as dimensões construtivas do protótipo da bomba piezelétrica disponível para testes, restringindo os deslocamentos na fronteira externa de forma a representar adequadamente as condições de contorno impostas pela estrutura do mesmo. Além disso, foi especificado também as fronteiras onde ocorre o acoplamento do fluido com a estrutura.

A malha de elementos criada para a simulação em questão possui 18.400 elementos e encontra-se representada a seguir:

Figura 4.32. Malha de elementos finitos: fronteira de interação fluido-estrutura (a) e condições de contorno de deslocamento e tensão (b).

A seguir encontra-se, ainda, um detalhe da malha de elementos finitos mostrando as condições de contorno de deslocamento e tensão impostas no modelo.

Figura 4.33. Detalhe da aplicação de condições de contorno.

Na aplicação das tensões, os nós dos eletrodos da parte interna do atuador (que fazem contato com a parte metálica do mesmo) foram agrupados de forma a facilitar a análise de impedância elétrica. Quanto à tensão aplicada considerada na simulação, os eletrodos internos do atuador receberam uma carga de 100V enquanto os eletrodos externos foram considerados aterrados (0V).

Com o intuito de se estudar as características de impedância elétrica e de frequências de ressonância e modos de vibrar, foi realizada uma análise harmônica do atuador bilaminar piezoelétrico (Nader, 2002). Os resultados encontrados serão mostrados a seguir.

Através da análise harmônica do atuador bilaminar piezoelétrico foi possível constatar a primeira frequência de ressonância do mesmo com o valor de 20Hz (fig. 4.34), uma vez que considera-se que o atuador entra em ressonância quando sua impedância é mínima, fazendo com que a corrente passando pelo mesmo atinja um valor máximo, maximizando assim, os deslocamentos para um atuador excitado nessa frequência. Para comprovar esta hipótese adotada, é possível também analisar os deslocamentos da extremidade do atuador em relação à frequência e analisar os dois gráficos juntos.

Figura 4.34. Impedância elétrica e deslocamento na extremidade do atuador simulados no ANSYS (0 a 50Hz)

Analisando o gráfico, é possível notar a coincidência entre o valor mínimo de impedância para o atuador e o máximo deslocamento na extremidade do atuador bilaminar.

Finalmente, analisou-se o modo de vibrar para essa frequência:

Figura 4.35. Primeiro modo de vibrar (20Hz)

Como pode ser notado, a primeira frequência de ressonância do atuador bilaminar piezelétrico, que ficava em torno de $\sim 75\text{Hz}$ no vácuo, passa para o valor de 20Hz. Isto se deve à presença da massa fluida contida no interior da bomba piezelétrica, na qual o atuador encontra-se submerso.

De maneira análoga, a segunda frequência de ressonância do atuador submerso foi obtida através da observação da curva de impedância elétrica do atuador piezelétrico.

É observado outro valor mínimo de impedância elétrica na frequência de 278Hz. Novamente, vale fazer a comparação entre a curva de impedância e o deslocamento na extremidade do atuador piezelétrico:

Figura 4.36. Impedância elétrica e deslocamento na extremidade do atuador simulados no ANSYS (200 a 500Hz)

Embora o máximo deslocamento pareça estar ligeiramente deslocado do mínimo valor de impedância ainda é clara a relação entre as duas curvas, validando, novamente a hipótese considerada.

O modo de vibrar para essa frequência tem a seguinte forma:

Figura 4.37. Segundo modo de vibrar (278Hz)

Para o segundo modo de vibrar é possível fazer a comparação com dados experimentais obtidos através da caracterização do atuador bilaminar piezoelétrico com a utilização do impedômetro fasorial HP4194A. É importante ressaltar que a primeira frequência de ressonância não pôde ser comparada devido ao fato do impedômetro começar a operar somente com frequências superiores a 100Hz. Assim, ressalta-se novamente a importância e necessidade das simulações computacionais nesse tipo de projeto.

Figura 4.38. Curva experimental de impedância elétrica do atuador (200 a 500Hz)

Na curva experimental de impedância elétrica obtida para o atuador bilaminar é possível notar um valor mínimo de impedância na frequência de 277Hz, enquanto a

simulação computacional obteve um resultado de 278Hz. A proximidade dos dados mostra a validade da simulação computacional para a caracterização deste atuador.

No entanto, próximo a 340Hz, nota-se outro mínimo de impedância elétrica, mostrando que deve haver aí outra frequência de ressonância. Os dados de impedância elétrica obtidos computacionalmente não apresentam o mínimo em torno de 340Hz. Este valor deve ser proveniente de um modo de vibração transversal ou torsional conforme mostrado na figura a seguir:

Figura 4.39. Modos de vibrar do atuador bilaminar piezelétrico

A simulação bidimensional realizada para o atuador bilaminar piezelétrico não é capaz de representar modos transversais e torsionais de vibrar, tendo o mesmo, apenas sido detectado experimentalmente através do estudo de sua curva de impedância.

Ainda comparando a análise de impedância elétrica realizada experimental e computacionalmente, pode-se analisar a curva de impedância elétrica para valores de frequência que passam pelo terceiro e quarto modos de vibrar.

Figura 4.40. Impedância elétrica do atuador bilaminar simulada no ANSYS (500 a 4000Hz)

Foram, então, identificados através da simulação computacional o terceiro e quarto modos de vibrar do atuador piezelétrico, nas frequências de 1190Hz e 3288Hz, respectivamente, cujos modos de vibrar estão mostrados a seguir:

Figura 4.41. Terceiro modo de vibrar (1190Hz)

Figura 4.42. Quarto modo de vibrar (3288Hz)

Para efeitos de comparação, pode-se considerar também a curva de impedância elétrica obtida experimentalmente para a mesma faixa de frequência:

Figura 4.43. Curva experimental de impedância elétrica do atuador (500 a 4000Hz)

Nota-se assim que, experimentalmente, é possível identificar claramente o quarto modo de vibrar em torno da frequência de 2800Hz. Computacionalmente o valor da frequência para o quarto modo de vibrar apresentou valor de 3288Hz, ou seja, uma diferença de quase 20% entre os resultados. Tal fato pode ser explicado pela discretização utilizada na simulação do atuador bilaminar piezelétrico em meio fluido, com 2 elementos na espessura de cada camada do atuador (PZT, metal e PZT), sendo que, a divisão com poucos elementos torna o modelo mais rígido, fazendo com que suas frequências de ressonância tenham seus valores aumentados principalmente para modos de vibrar mais elevados, que devem ficar mais suscetíveis a esse aumento na rigidez causado pela discretização inadequada da malha de elementos finitos. A não-opção por um refinamento na malha de elementos finitos é explicada pelo peso computacional desnecessário de, por exemplo, utilizar a mesma malha utilizada na simulação do atuador sem a presença do meio fluido (com 5 elementos na espessura de cada camada), que não traria informações relevantes

sobre o atuador, uma vez que a bomba não deve operar nesse modo de vibrar. A essa hipótese soma-se o fato de as propriedades piezelétricas não serem bem conhecidas, o que também pode estar afetando os resultados obtidos e, além disso, o amortecimento não foi considerado nessa modelagem do atuador piezelétrico.

Outro ponto importante a ser notado é a presença pouco definida ou mesmo ausência de um mínimo na impedância do atuador piezelétrico para o terceiro modo de vibrar. Na faixa em torno de 1000~1100Hz, próximo ao valor de 1190Hz obtido computacionalmente, é possível observar um comportamento na curva de impedância semelhante à presença de um vale seguido de um pico observados nos outros modos de vibrar, mas muito pouco definido e que, poderia facilmente passar despercebido sem o auxílio da simulação computacional no estudo do mesmo.

Da análise através de elementos finitos do atuador bilaminar piezelétrico em meio fluido, duas informações importantes e relevantes no estudo da bomba piezelétrica foram conseguidas.

A primeira diz respeito aos modos de vibrar do atuador bilaminar, que oscila em seu segundo modo de vibrar na faixa de frequência de operação da bomba piezelétrica (200~300Hz) e não no primeiro modo conforme havia sendo considerado até então. A simulação computacional mostrou-se extremamente importante na identificação desse modo de vibrar uma vez que através da metodologia experimental com a utilização do impedômetro para levantamento da curva de impedância elétrica não foi possível identificar o primeiro modo de vibrar em 20Hz dada a limitação técnica do aparelho.

A segunda informação importante conseguida refere-se às amplitudes de deslocamento do atuador em meio fluido, pois, através dos dados conseguidos através da análise harmônica do mesmo, as amplitudes de deslocamento têm sentido físico, ao contrário da análise modal que fornece apenas valores relativos entre pontos da estrutura. Com a aplicação de uma tensão de 100V é observado um deslocamento máximo de 341 μ m, ou 682 μ m de deslocamento pico-a-pico. Como o atuador piezelétrico possui comportamento linear entre tensão elétrica aplicada e deslocamentos gerados, para uma tensão de 30V (60V pico-a-pico, valor utilizado nos testes experimentais do mesmo), chega-se a um deslocamento de cerca de 200 μ m pico-a-pico na extremidade do atuador piezelétrico quando o mesmo opera em seu

segundo modo de vibrar. Assim, verifica-se a validade dos valores de amplitude máxima que vinham sendo considerados até o momento ($150\mu\text{m} \sim 250\mu\text{m}$).

4.5. Dados Experimentais Atualizados

Com os novos dados obtidos computacionalmente e também com os novos dados experimentais disponíveis, uma série de novas simulações para o sistema flúidico da bomba piezelétrica foi realizada, de forma a refinar os dados preliminares obtidos até então. Da caracterização experimental mais recente e das simulações computacionais veio a nova frequência de operação da bomba, que deixa de operar em 370Hz e passa a operar na faixa de 270 a 280Hz, faixa onde se encontra o valor de 278Hz obtido computacionalmente para o modo de vibrar da bomba piezelétrica. Da simulação computacional veio também a informação que o modo de vibrar em que a bomba opera é o segundo modo e não o primeiro conforme vinha sendo considerado. Além disso, a amplitude máxima de deslocamento na extremidade do atuador passou a ser obtida computacionalmente e não apenas estimada conforme a abordagem anterior e, dada a linearidade entre tensão e deslocamento, pode-se considerar a variável ‘tensão máxima’ ao invés de ‘amplitude de deslocamento’.

Figura 4.44. Geometria para segundo modo de vibrar

V: 30V (60V pico-a-pico)
f: 278Hz
h: 4mm

L_{entrada} : 1mm
 L_{atuador} : 39mm
 $L_{\text{saída}}$: 12mm

Em relação ao modelo simulado e estudado preliminarmente na seção 4.2.4, as dimensões geométricas da bomba piezelétrica foram mantidas. As diferenças principais são: o modo de vibrar, que passa a ser o segundo modo; a amplitude máxima de deslocamento que, passa a ser escrita em função da tensão aplicada na cerâmica; e a frequência de operação da bomba piezelétrica, que passa a operar em 278Hz. A malha de elementos gerada para esse modelo contém 3226 elementos e pode ser observada a seguir:

Figura 4.45. Malha de elementos finitos (3226 elementos)

O tempo final considerado na simulação foi de 1s, subdividido em 50000 passos no tempo e foi aplicado, novamente, um diferencial nulo de pressão entre a entrada e a saída do sistema. A simulação gerou o seguinte resultado:

Figura 4.46. Vazão média (2º modo de vibrar)

Conforme é possível observar no gráfico, a vazão gerada pelo modelo é de cerca de 17,0 cc/min, enquanto os dados do protótipo construído e caracterizado experimentalmente apontam uma vazão de 14,6 cc/min.

A seguir é possível ver os vetores de velocidade obtidos através da simulação computacional para a bomba piezelétrica. É possível notar, primeiramente, os vetores de velocidade na região próxima à extremidade do atuador piezelétrico com a formação dos vórtices invertidos que geram a vazão para a bomba. Na seção de saída da bomba piezelétrica é possível notar os vetores de velocidade ‘apontando’ na direção de saída da bomba, ou seja, a geração de fluxo de fluido através do sistema.

Figura 4.47. Vetores de velocidade da bomba piezelétrica

É possível extrair também informações a respeito das pressões a que o fluido é submetido durante a movimentação do atuador bilaminar piezelétrico.

Figura 4.48. Campo de pressões da bomba piezelétrica

Os valores máximo e mínimo de pressão são observados também na região próxima à extremidade da bomba. Isso deve ser causado pelo fato de haverem maiores deslocamentos nessa região. A fig. 4.48 representa uma situação em que o

atuador está realizando um movimento de subida, pressionando o fluido na região superior e diminuindo a pressão na região inferior.

A coleta de dados experimentais foi feita com a pigmentação do fluido (água) com permanganato de potássio, com o qual é possível acompanhar a entrada do fluido pelo duto de entrada. Através da medição de tempo que a bomba leva para deslocar o fluido de um ponto a outro dentro de um duto com dimensões conhecidas e utilizando-se de conceitos básicos de mecânica dos fluidos, é possível estabelecer o valor médio da velocidade pela seção, sendo então, possível determinar a vazão gerada pela bomba de fluxo piezelétrica.

A seguir, segue uma figura mostrando a movimentação do fluido até a entrada da bomba piezelétrica. A diferença entre os valores obtidos computacional e experimentalmente são de cerca de 16%, o que mostra a validade dos resultados computacionais obtidos.

Figura 4.49. Sequência de teste experimental da bomba piezelétrica (Nakasone et al., 2005; Pires et al., 2005)

4.6. Máxima Pressão

Os testes experimentais da bomba de fluxo piezelétrica (Nakasone; Pires; Silva, 2004; Nakasone et al, 2005; Pires; Nakasone; Silva, 2004; Pires et al, 2005; Pires et al, 2006) mostram que a mesma é bastante influenciada por qualquer variação de pressão que ocorra entre a sua entrada e saída, sendo que a quase totalidade dos testes realizados com a mesma é para situações em que há um diferencial nulo de pressão entre a sua entrada e saída.

Com o intuito de melhor elucidar a questão da pressão máxima suportada pela bomba piezelétrica, foi realizada uma série de simulações nas quais uma pressão foi imposta na saída da mesma.

A partir da mesma combinação de parâmetros e condições de contorno e, modificando somente a pressão de saída da bomba piezelétrica, foram impostas pressões de 100mPa a 1000mPa (ou 1Pa), correspondendo de 0,01mmH₂O a 0,10mmH₂O, respectivamente.

Figura 4.50. Curvas de vazão para diferentes pressões de saída

Analisando o gráfico de resultados é possível notar o quão sensível a qualquer variação de pressão a bomba piezelétrica é. Para uma pressão máxima de 0,09 mmH₂O, ela ainda apresenta uma vazão de cerca de 0,85 cc/min, mas para 0,10 mmH₂O a pressão na saída já passa a ser superior à diferença de pressão que a bomba consegue gerar e, por conseguinte, tem-se fluxo no sentido contrário.

Com as informações relativas à pressão, é possível traçar a curva característica, relacionando vazão e pressão para esse protótipo da bomba piezelétrica.

Figura 4.51. Curva vazão x pressão para a bomba piezelétrica

4.7. Simulação Utilizando Outros Fluidos

Além da água, outros fluidos foram considerados na simulação computacional da bomba de fluxo piezelétrica, como o etanol e o sangue.

4.7.1. Simulação para Etanol

Inicialmente, antes da simulação da bomba piezelétrica para determinação de vazão considerando o etanol como fluido, foi feita uma análise preliminar do comportamento do atuador piezelétrico inserido num meio contendo etanol, de maneira similar à análise feita para o atuador inserido em meio aquoso. A semelhança entre os resultados permitiu que, na simulação, fossem consideradas as mesmas amplitudes máximas de deslocamento, o mesmo modo de vibrar e a mesma frequência de atuação da bomba piezelétrica considerando a água como fluido de trabalho.

As propriedades do fluido utilizadas foram as seguintes:

$$\rho: 789 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu: 0,00177 \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2}, \text{ (Fox; McDonald, 1992)}$$

Para esta simulação, foi considerado um tempo final equivalente a 2,9s, equivalente a 800 ciclos de oscilação do atuador até que a vazão gerada pelo sistema atingisse um valor estável. A frequência de oscilação do atuador foi de 278Hz e a tensão aplicada, 30V (30V pico-a-pico, mesmo valor aplicado no caso da água). A seguir, o gráfico de vazão gerado através da simulação:

Figura 4.52. Vazão média para etanol

A bomba apresentou uma vazão média de 12,8 cc/min para o fluido etanol para as condições acima mencionadas.

4.7.2. Simulação para Sangue

Outro fluido considerado para a simulação da bomba de fluxo piezelétrica foi o sangue, dada a motivação inicial do trabalho ter sido uma bomba de fluxo para aplicações em bioengenharia e na área médica.

Trata-se, no entanto, de um fluido não-newtoniano, apresentando características não-lineares em relação à velocidade e tensões de cisalhamento. No entanto, tem-se que, para simulações computacionais onde se considera o fluido sangue, o mesmo pode ser modelado como fluido newtoniano, uma vez que, para as velocidades envolvidas nesses problemas, o comportamento do fluido passa a ser muito similar ao de fluidos newtonianos.

Assim, foram consideradas as seguintes propriedades:

$$\rho: 1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu: 0,0035 \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2}$$

Novamente, optou-se por considerar a mesma frequência de trabalho e modo de vibrar das simulações iniciais que tinham a água como fluido de trabalho. No caso da simulação para o sangue, foi considerada uma tensão de 30V (60V pico a pico) aplicada no atuador piezelétrico (mesma tensão aplicada no caso da água e do etanol).

O gráfico de vazão gerado por essa simulação é mostrado a seguir:

Figura 4.53. Vazão média para sangue

A simulação considerando o sangue apresentou um resultado bastante semelhante à simulação considerando a água como fluido de trabalho. Novamente a vazão apresentou um valor de 17,0 cc/min. Essa semelhança de resultados deve ser causada pelo valor da densidade dos fluidos que são bastante próximas (diferença de 5%).

4.8. Redução da Escala

Foram também realizadas simulações computacionais para o estudo de uma bomba de fluxo piezelétrica em escala reduzida, visando uma futura miniaturização do sistema. Todos os dados de dimensões geométricas utilizados tiveram como base o atuador piezelétrico e os protótipos da bomba ensaiados até o presente momento (Pires; Nakasone; Silva, 2004; Pires et al, 2005; Pires et al, 2006; Nakasone; Pires; Silva, 2004; Nakasone et al, 2005).

Como um dos grandes potenciais da bomba de fluxo piezelétrica é a sua miniaturização, foi feito um estudo para uma bomba piezelétrica utilizando um atuador com as dimensões: $L_{total} = 10\text{mm}$; $L_{PZT} = 8\text{mm}$; $L_{engaste} = 4\text{mm}$; $e_{PZT} = 0,2\text{mm}$; $e_{metal} = 0,2\text{mm}$, ou seja, o atuador utilizado na construção de protótipos e considerado nas simulações computacionais até este ponto tem um comprimento de 40mm e, neste item, será proposto um atuador com um comprimento de 10mm.

As simulações partiram da análise do atuador em meio fluido para obtenção de suas frequências de ressonância e modos de vibrar que foram impostos como condições de contorno para a análise fluídica de uma bomba de fluxo baseada neste novo atuador proposto.

4.8.1. Atuador em Meio Fluido

Para a análise do atuador bilaminar piezelétrico em meio fluido foi utilizada a malha de elementos finitos mostrada a seguir:

Figura 4.54. Malha de elementos finitos

Esta malha contém 6.400 elementos e foi realizada uma análise harmônica do atuador bilaminar piezelétrico de forma a determinar a sua frequência de ressonância e modo de vibrar.

Da análise harmônica foi obtido o seguinte resultado:

Figura 4.55. Impedância elétrica para o atuador em escala menor (200 a 1000Hz)

Observa-se um mínimo no gráfico de impedância para o valor de 588Hz, ou seja, nesta frequência ocorre uma ressonância do atuador piezelétrico proposto. É possível observar o modo de vibrar para este valor de frequência.

Figura 4.56. Deslocamentos no atuador para 588Hz

Através desta análise foi possível constatar que em 588Hz o atuador vibra em seu primeiro modo.

Outro mínimo na curva de impedância elétrica no projeto deste atuador foi encontrado em 10.000Hz. Para esta frequência de ressonância observa-se o seguinte modo de vibrar:

Figura 4.57. Deslocamentos do atuador para 10.000Hz

Desta forma, nota-se que em 588Hz e em 10.000Hz têm-se o primeiro e segundo modos de vibrar deste atuador bilaminar piezelétrico imerso em água.

4.8.2. Simulação para Bomba Piezelétrica em Escala Reduzida

Partindo da análise prévia, do atuador bilaminar piezelétrico proposto, em meio fluido, foi possível extrair informações de suas frequências de ressonância e modos de vibrar.

Assim, foi possível realizar a simulação para avaliação do desempenho de uma bomba de fluxo piezelétrica que utilizasse um atuador com essas dimensões e, para esta simulação, foi utilizada a seguinte malha de elementos finitos, com 1.258 elementos:

Figura 4.58. Malha de elementos finitos

Da mesma forma feita nas demais simulações foi considerado um diferencial nulo de pressão entre a entrada e a saída. Os deslocamentos do atuador foram prescritos no meio fluido através dos dados obtidos na análise prévia do atuador, considerando amplitudes de deslocamentos proporcionais a uma tensão de 60V (pico-a-pico) aplicada na cerâmica piezelétrica a uma frequência de 588Hz.

A bomba piezelétrica nesta escala gerou uma vazão de 29,2cc/min, como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 4.59. Vazão média para bomba em escala reduzida

Podem-se ver também os vetores de velocidade para a bomba piezelétrica em escala reduzida. Novamente é possível notar a formação de um vórtice invertido na região próxima à extremidade do atuador e, na seção de saída do duto, os vetores de velocidade indicando que existe vazão sendo gerada pela bomba.

Figura 4.60. Vetores de velocidade para a bomba em escala reduzida

Finalmente, apresenta-se o campo de pressões gerados pela bomba piezelétrica durante a sua operação:

Figura 4.61. Campo de pressões para a bomba em escala reduzida

De maneira análoga ao caso anteriormente apresentado, este campo de pressões foi obtido num instante em que o atuador piezelétrico está realizando um movimento ascendente, pressionando o fluido na região superior do canal e diminuindo a pressão na região inferior do mesmo.

Para a bomba piezelétrica em escala reduzida não existe, atualmente, protótipo e dados experimentais para realização de uma comparação de resultados e aferição do modelo computacional. No entanto, dada a validade dos resultados computacionais obtidos para os outros modelos testados, tem-se que, para uma bomba de fluxo piezelétrica construída nesta escala reduzida, a vazão gerada deve

apresentar um valor próximo ao obtido computacionalmente. Assim, a simulação computacional passa a ser uma importante ferramenta no projeto da bomba de fluxo piezelétrica, podendo fornecer dados válidos sem a necessidade de construção de protótipos, agilizando o fluxo de projeto da mesma.

5. ESTUDO DE SENSIBILIDADE

Numa etapa anterior à otimização da bomba piezelétrica, foi feito um estudo de sensibilidade da bomba piezelétrica considerando as variáveis: f (frequência de oscilação do atuador); h (altura do duto); e V (tensão aplicada no atuador piezelétrico). Este estudo partiu dos parâmetros de simulação mostrados no item 4.5 deste documento, com $f = 278\text{Hz}$; $h = 4\text{mm}$; e $V = 60V_{pp}$.

5.1. Sensibilidade em Relação à Frequência

A primeira variável a ser analisada neste estudo de sensibilidade foi a frequência de oscilação do atuador piezelétrico. Mantendo-se fixas as demais variáveis e variando a frequência de oscilação do atuador entre 200Hz e 350Hz (faixa próxima à operação do protótipo da bomba piezelétrica), foi obtido o seguinte resultado:

Figura 5.1. Sensibilidade em relação à frequência

Conforme pode ser observado na fig. 5.1, o desempenho da bomba piezelétrica aumenta conforme a sua frequência de operação é aumentada. A relação entre o desempenho e a frequência de oscilação apresenta um caráter linear.

5.2. Sensibilidade em Relação à Tensão Elétrica

Em seguida, foi estudado comportamento da bomba piezelétrica para diversos valores de tensão elétrica aplicada ao atuador bilaminar piezelétrico. Novamente, mantendo fixo os demais parâmetros a tensão elétrica aplicada no bilaminar (tensão pico-a-pico) foi variada de 10V a 100V, gerando os seguintes resultados:

Figura 5.2. Sensibilidade em relação à tensão elétrica

Assim como no caso da frequência de oscilação do atuador, o desempenho da bomba piezelétrica para ser afetado crescente e linearmente com a tensão aplicada no atuador.

5.3. Sensibilidade em Relação à Altura do Duto

Por fim, foi estudada a influência da altura do duto no desempenho da bomba de fluxo piezelétrica. Os valores considerados nessa análise encontram-se na faixa entre 3mm e 8mm de altura. Os resultados obtidos estão mostrados a seguir:

Figura 5.3. Sensibilidade em relação à altura do duto

Finalmente, o desempenho da bomba piezelétrica é aumentado quando se aumenta a altura do duto. No entanto, ao contrário do que acontece com a tensão aplicada e a frequência de oscilação do atuador, não é possível estabelecer uma linearidade entre a vazão gerada pela bomba e a altura do duto.

6. OTIMIZAÇÃO

A etapa final do trabalho corresponde à incursão no problema de otimização para a bomba de fluxo piezelétrica. A otimização é feita através da integração entre os softwares ANSYS, de elementos finitos e Altair Hyperstudy, de otimização, conforme descrito no apêndice deste documento.

O problema de otimização pode ser definido:

Maximizar $Q(f, h, V)$

f, h, V

tal que:

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$$

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$$

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$$

onde Q é a vazão de fluido gerado pela bomba, em função dos parâmetros previamente estudados (frequência de oscilação, altura do duto e tensão aplicada no atuador).

6.1. Otimização para Água

Para o caso da água, foram considerados as seguintes restrições:
 $100\text{Hz} \leq f \leq 1000\text{Hz}$; $3\text{mm} \leq h \leq 6\text{mm}$ e $10V \leq V \leq 60V$ (pico-a-pico).

Obteve-se a seguinte convergência para a função objetivo:

Figura 6.1. Função objetivo (água)

As variáveis de projeto atingiram os seguintes valores ao final da otimização: $f = 1000\text{Hz}$, $h = 6\text{mm}$ e $V = 60V$. Todas as variáveis atingiram os valores máximos estabelecidos e a vazão atingiu um valor de 66,95 cc/min para esta combinação de parâmetros.

6.2. Otimização para Etanol

Foi considerada também a otimização considerando o etanol como fluido de trabalho, com as seguintes restrições: $200\text{Hz} \leq f \leq 300\text{Hz}$; $3\text{mm} \leq h \leq 6\text{mm}$ e $10V \leq V \leq 60V$ (pico-a-pico).

As variáveis de projeto atingiram os seguintes valores ao final da otimização: $f = 300\text{Hz}$, $h = 6\text{mm}$ e $V = 60V$. Todas as variáveis atingiram novamente os valores máximos estabelecidos e a vazão atingiu um valor de 28,09 cc/min para esta combinação de parâmetros.

6.3. Otimização com Pressão de Saída

A última abordagem ao problema de otimização para a bomba de fluxo piezelétrica considerou a pressão de saída no sistema. O interesse por tal abordagem vem do fato da bomba piezelétrica ser capaz de gerar um diferencial de pressão muito pequeno (Pires et al, 2006). Assim, através de um processo de otimização considerando um diferencial de pressão não-nulo entre a entrada e saída da bomba piezelétrica pode fornecer informações relevantes à evolução de seu projeto.

Foram considerados dois valores de pressão, 0,5Pa (0,05mmH₂O) e 1,0Pa (0,1mmH₂O), sendo a otimização realizada para cada caso com as seguintes restrições: $200Hz \leq f \leq 300Hz$; $3mm \leq h \leq 6mm$ e $10V \leq V \leq 60V$ (pico-a-pico).

No caso da pressão de saída de 0,5Pa, as variáveis de projeto assumiram os seguintes valores ao final da otimização: $f = 200Hz$, $h = 6mm$ e $V = 10V$, gerando uma vazão de 69,44 cc/min. Já com a pressão de saída fixada em 1,0Pa, as variáveis de projeto também assumiram os valores $f = 200Hz$, $h = 6mm$ e $V = 10V$, com uma vazão de 42,89 cc/min.

7. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Em relação à aferição da modelagem computacional, uma primeira comparação com um resultado da literatura mostrou a coerência entre o modelo criado durante este projeto com um resultado publicado em revista científica. Os resultados obtidos através da simulação através dos softwares “ANSYS” e “Fluent” mostraram-se coerentes com a literatura. Desta forma, optou-se por utilizar o software “ANSYS”, dada a experiência e maior adequação do mesmo.

Em relação às simulações da bomba piezelétrica, foram implementados modelos que representam a curva de deslocamento para esse tipo de atuador através de resultados da literatura. Simulações iniciais verificaram a importância do recurso de malha móvel uma vez que a malha fixa não foi suficiente para a solução do problema, por não representar adequadamente as condições de contorno relativas à pressão.

Foram também feitas simulações para um modelo com as dimensões do protótipo que atualmente vem sendo ensaiado (por outro aluno de mestrado), sendo que os resultados obtidos mostram concordância com os dados experimentais colhidos até o momento.

Em relação à simulação do atuador bilaminar piezelétrico, as simulações mostraram sua relevância através, principalmente, da caracterização do atuador inserido em meio fluido, onde foi possível traçar suas curvas de impedância elétrica para comparação com dados experimentais disponíveis. A simulação computacional bidimensional, embora possua certas limitações, como por exemplo, não permitir identificar modos transversais ou torsionais de vibrar, mostra-se bastante efetiva no estudo deste sistema, uma vez que, sem ela, dificilmente teria sido identificado o modo de vibrar com o qual o atuador bilaminar piezelétrico age sobre o fluido para geração de vazão, dado a limitação do equipamento utilizado na caracterização experimental que inviabiliza realizar uma medição experimental dos deslocamentos do atuador operando em meio fluido.

A pressão máxima suportada pela bomba piezelétrica também pôde ser estimada com o auxílio da ferramenta de simulação computacional, mostrando que a bomba mostra-se bastante suscetível a quaisquer variações de pressão na sua saída,

prejudicando e até mesmo anulando sua vazão quando qualquer perturbação é notada nessa região. Com o auxílio da simulação computacional pôde ser averiguada que a pressão máxima suportada pela bomba não deve chegar a 0,1mmH₂O (1Pa).

Foram ainda considerados outros fluidos de trabalho como o etanol e o sangue, dada a motivação inicial do trabalho e da proposta de um novo princípio de bombeamento para aplicações em microfluidica, automação laboratorial, em bioengenharia e na área médica.

A simulação da bomba piezelétrica em outra escala gerou resultados que podem ser utilizados futuramente para a construção de protótipos em escala reduzida, explorando o potencial de miniaturização do atuador piezelétrico.

A incursão no problema de otimização para a bomba piezelétrica mostrou a sua validade para os casos estudados, tendo gerado aumentos expressivos no desempenho do sistema através da busca racionalizada por uma combinação de parâmetros ótima que ocasionem uma maior vazão no sistema.

Como trabalho futuro, sugere-se um estudo aprofundado de sistemas que eventualmente combinem mais de um atuador piezelétrico, em série ou em paralelo, de forma a se melhorar o desempenho da mesma; outros tipos de atuadores com mais tiras piezelétricas sendo acionadas; outros princípios de bombeamento baseados em atuadores piezelétricos; e mesmo um estudo mais aprofundado sobre placas piezelétricas e sua otimização, de modo a se projetar atuadores que operarem em modos de vibrar apropriados e em frequências desejadas.

8. ANEXOS

8.1. Software Fluent

8.1.1. Algoritmo de Solução Segregado x Acoplado

O “Fluent” emprega dois tipos de métodos numéricos (“solvers”) para a solução dos sistemas: algoritmo de solução acoplado (“coupled solver”) e segregado (“segregated solver”), que utilizam princípios diferentes na linearização e solução dos sistemas lineares do problema.

No caso do algoritmo segregado, as equações que regem o fenômeno são resolvidas sequencialmente, ou seja, separadas umas das outras. Uma série de iterações se faz necessária para que se verifique a convergência da solução. O algoritmo acoplado resolve as equações regentes de continuidade, quantidade de movimento e energia simultaneamente. Outras equações escalares são resolvidas de maneira sequencial (desacopladas), de maneira semelhante ao algoritmo segregado.

Para o solucionador segregado, as equações de continuidade (em regime permanente) e quantidade de movimento ficam expressas matricialmente da seguinte forma, respectivamente (Fluent, 2003):

$$\oint \rho \mathbf{v} d\mathbf{A} = 0 \quad (8.1)$$

$$\oint \rho \mathbf{v} \mathbf{v} d\mathbf{A} = -\oint p \mathbf{I} d\mathbf{A} + \oint \bar{\bar{\tau}} d\mathbf{A} + \int_V \mathbf{F} dV \quad (8.2)$$

onde:

I matriz identidade

$\bar{\bar{\tau}}$ tensor de tensões

F vetor de forças

Para o solucionador acoplado, todas as equações devem ser escritas numa mesma matriz, que fica da seguinte forma (Fluent, 2003):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \mathbf{W} dV + \oint [\mathbf{F} - \mathbf{G}] d\mathbf{A} = \int_V \mathbf{H} dV \quad (8.3)$$

onde:

$$\mathbf{W} = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{Bmatrix} \rho \mathbf{v} \\ \rho \mathbf{v}u + p\hat{\mathbf{i}} \\ \rho \mathbf{v}v + p\hat{\mathbf{j}} \\ \rho \mathbf{v}w + p\hat{\mathbf{k}} \\ \rho \mathbf{v}E + p\mathbf{v} \end{Bmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij}v_j + \mathbf{q} \end{Bmatrix}$$

e o vetor $\mathbf{H}$ contém o termo de geração interna como forças de corpo ou fonte de energia e:

- ρ densidade
- $\mathbf{v}$ velocidade
- E energia por unidade de massa
- p pressão do fluido
- $\mathbf{q}$ fluxo de calor
- $\hat{\mathbf{i}}, \hat{\mathbf{j}}, \hat{\mathbf{k}}$ versores

8.1.2. Linearização: Implícita x Explícita

Seja qual for o algoritmo de solução escolhido, as equações não-lineares que regem o fenômeno são linearizadas de forma a produzir um sistema de equações para as variáveis dependentes em cada célula computacional (ver fig. 8.1 adiante). O sistema linear resultante é então solucionado e a solução é atualizada.

A forma, implícita ou explícita, pela qual a linearização ocorre tem haver com as variáveis ou conjunto de variáveis no qual há interesse. Por linearização implícita ou explícita se entende o seguinte:

- **implícita:** para uma dada variável, o valor desconhecido em cada célula é computado utilizando uma relação que inclui tanto valores conhecidos como desconhecidos de células vizinhas. Assim, cada incógnita aparecerá em mais de uma equação no sistema, o que faz com que as mesmas tenham que ser resolvidas de forma simultânea para dar os valores desconhecidos.
- **explícita:** para uma dada variável, o valor desconhecido em cada célula é computado utilizando uma relação que leva em conta somente valores existentes. Assim sendo, cada incógnita aparece em somente uma equação do sistema global, sendo possível resolver as equações independentemente para a obtenção dos valores desconhecidos.

8.1.3. Discretização

O software “Fluent” utiliza uma técnica baseada em volumes de controle para converter as equações que regem o fenômeno em expressões que possam ser resolvidas numericamente. Essa técnica baseada em volumes de controle consiste na integração das equações regentes sobre cada volume, gerando equações discretas que garantem a conservação de cada quantidade num dado domínio.

A discretização das equações regentes pode ser facilmente ilustrada considerando, como exemplo, a equação de conservação para o transporte de um dado escalar ϕ . A demonstração pode ser feita através da seguinte formulação integral (Fluent, 2003):

$$\oint \rho \phi \mathbf{v} d\mathbf{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi d\mathbf{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (8.4)$$

onde,

ρ : densidade

$\mathbf{v}$: vetor de velocidade ($= u\mathbf{i} + v\mathbf{j}$ no caso 2D)

$\mathbf{A}$: vetor área

- Γ_ϕ : coeficiente de difusão para ϕ
 $\nabla\phi$: gradiente de ϕ ($= (\partial\phi/\partial x)\mathbf{i} + (\partial\phi/\partial y)\mathbf{j}$ no caso 2D)
 S_ϕ : geração de ϕ por unidade de volume

A eq. (8.4) é aplicada a cada volume de controle, ou célula, em um dado domínio. A fig. 8.1 mostra um exemplo bidimensional de um volume de controle triangular.

Figura 8.1. Exemplo de volume de controle

A discretização para um dado volume de controle fica (Fluent, 2003):

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \mathbf{v}_f \phi_f \mathbf{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_n \mathbf{A}_f + S_\phi dV \quad (8.5)$$

onde,

- N_{faces} : números de faces
 ϕ_f : valor de ϕ conveccionado pela face f
 $\rho_f \mathbf{v}_f \mathbf{A}_f$: fluxo de massa pela face
 $\mathbf{A}_f$: área da face f
 $(\nabla \phi)_n$: magnitude de $\nabla \phi$ normal à face f

V : volume da célula

As equações resolvidas pelo software “Fluent” seguem o formato apresentado acima, sendo facilmente aplicado a malhas desestruturadas (“unstructured meshes”) e casos multidimensionais.

Como padrão, o software armazena os valores para o escalar ϕ , nas centróides de cada célula (c0 e c1 na fig. 8.1).

8.1.4. Malha Móvel

O Fluent utiliza três métodos diferentes para lidar com malhas móveis: o primeiro baseado num efeito de suavização elástica, o segundo baseado num processo de camadas dinâmico e o terceiro no qual é feito um remalhamento local.

No primeiro método, baseado num modelo elástico, a malha passa a ser vista como uma rede de molas interconectadas, sendo a posição inicial dos nós, a posição de equilíbrio do sistema. O deslocamento em um determinado nó gera uma força proporcional ao deslocamento em todas as molas conectadas ao mesmo.

Figura 8.2. Suavização elástica

Em malhas prismáticas (quadradas ou hexaédricas), o processo de camadas dinâmico pode ser utilizado. Neste processo, conforme uma fronteira é movida, uma camada da malha pode ser deformada, criada ou removida da mesma de forma a se adequar às condições desejadas.

Figura 8.3. Processo dinâmico de camadas

O terceiro método utilizado pelo software “Fluent” para lidar com malhas móveis é o remalhamento local. Quando os deslocamentos são pequenos o suficiente, o método baseado em suavização elástica é capaz de resolver o problema, no entanto, quando se passa a ter deslocamentos da ordem do tamanho de um elemento, este método pode invalidar a malha, gerando, por exemplo, células de volume negativo em seu interior. Nesses casos o remalhamento local é utilizado, sendo que o software redefine localmente a malha ao redor da fronteira móvel de modo a satisfazer as condições requeridas. O critério para remalhamento pode ser definido de três formas, através dos tamanhos máximos e mínimos para as células ou através da deformação do elemento (“skewness”).

8.2. “Altair Hyperstudy”

Para a etapa de otimização da bomba piezelétrica foi utilizado o software Altair Hyperstudy, capaz de realizar estudo de sensibilidade em problemas complexos bem como a otimização paramétrica para um dado sistema. O software é capaz de se comunicar com diversos softwares de elementos finitos, dentre eles o ANSYS, que está sendo utilizado neste projeto.

Para a utilização do ANSYS como “solver” no software HyperStudy é necessário primeiramente fazer a configuração do mesmo. O primeiro passo é realizar o registro do programa como um solver, e isto é feito através da edição do arquivo ‘preferences.mvw’. Deve-se incluir a seguinte linha (em destaque) indicando o arquivo executável do programa, na área apropriada:

```

*RegisterSolverScript(os,      "OptiStruct", {
getenv("ALTAIR_HOME") + "/optistruct/bin/optistruct.bat"
})
*RegisterSolverScript(templex, "Templex",    {
getenv("ALTAIR_HOME") + "/templex/bin/templex.exe" })
*RegisterSolverScript(hf,      "HyperForm", {
getenv("ALTAIR_HOME") + "/hf/bin/hfsol.bat" })
*RegisterSolverScript(Ansys    , "Ansys",
{"c:\Arquivos de Programas\ANSYS60\bin\intel\ansys60.exe"
})

```

Este procedimento faz com que o ANSYS passe a ser uma opção de solucionador para a simulação computacional de problemas a serem estudados e otimizados.

O primeiro passo é a criação de um modelo ('template') contendo as informações sobre o sistema que vai ser simulado.

Dentro do menu do Hyperstudy:

» Tools » Create Template...

Uma nova janela se abre e dentro dela é criado o modelo.

» File » Import

Seleciona-se, então, o arquivo de instruções escrito em "APDL" que contém as instruções para a simulação da bomba piezelétrica. O arquivo será então aberto e aparecerá a listagem das instruções da bomba piezelétrica.

Figura 8.4. Definição das variáveis

Os valores das variáveis devem ser seleccionados e, pressionando o botão direito do mouse surge um menu onde deve ser seleccionado:

» Create Design Variable

É aberta, então, uma janela onde se define o nome desta variável bem como o seu domínio. Deve-se repetir o processo para as três variáveis consideradas. A janela de programa deverá ficar da seguinte forma (fig. 8.5):

Figura 8.5. Variáveis de projeto

No lugar dos valores previamente definidos, surgem os nomes das variáveis criadas.

Pode-se ainda verificar o formato do modelo:

» **Templex » Show Templex**

O conteúdo da janela terá então o seguinte formato:

Figura 8.6. Formato do template

Na fig. 8.6 estão destacadas as definições das variáveis de projeto bem como seus respectivos domínios.

O último passo para a criação do modelo é exportar esse arquivo através dos comandos:

» **File » Export**

É possível, então, definir o nome do arquivo e salvá-lo.

O passo seguinte é selecionar o arquivo de preferências anteriormente editado, através das opções:

» **File » Set Preference File**

A partir deste ponto a utilização do software é bastante intuitiva. Quando solicitado deve-se selecionar o modelo criado. Estas etapas ainda não correspondem à otimização propriamente dita, sendo necessário executar uma simulação prévia. Este passo é essencial, pois é neste ponto que o software ‘aprende’ a interpretar os resultados obtidos.

O arquivo de saída gerado contém dados de velocidade, sendo necessário definir a vazão conforme a expressão descrita na fig. 8.7 (onde é feito uma média entre picos e vales da curva de velocidades para se obter um valor médio).

Figura 8.7. Determinação da vazão

Para conferir o valor numérico correspondente à expressão criada, seleciona-se:

» Evaluate response expression

Através deste comando será mostrado o valor destacado na fig. 8.8.

Figura 8.8. Conferindo o valor da expressão

Seguindo com a otimização, ocorre a definição dos domínios de projeto para as variáveis, bem como definição das restrições e da função objetivo. O uso do software é bastante intuitivo àqueles familiarizados com a teoria de otimização.

Para o problema da bomba não foram definidas restrições não-lineares, uma vez que somente restrições laterais, definidas como domínio das variáveis de projeto, estão presentes. A função objetivo do problema é a maximização da vazão. Todas essas definições condizem com o problema de otimização proposto.

Tendo definido o problema, faz-se a otimização propriamente dita.

8.3. “ANSYS”

Para a geração de um arquivo de dados foi utilizado o comando ***VWRITE**.

O primeiro passo para se escrever um arquivo é definir seu nome e sua extensão, tornando-o então disponível para receber os dados desejados. O comando ***CFOPEN**, cuja sintaxe é dada a seguir, realiza esta tarefa:

***CFOPEN, Fname, Ext, Dir, Loc**

onde:

‘*CFOPEN’ é a chamada da função;

‘Fname’ é o nome do arquivo a ser gerado;

‘Ext’ é a extensão do arquivo;

‘Dir’ é a localização do arquivo;

‘Loc’ define se o arquivo será sobrescrito ou se os novos dados serão anexados caso já exista um arquivo com o nome e extensão especificados.

Para realizar a escrita dos dados no arquivo é utilizado o comando:

***VWRITE, Par1, Par2, Par3, Par4, Par5, Par6, Par7, Par8, Par9, Par10**

onde:

‘*VWRITE’ é a chamada da função;

‘Par1’ a ‘Par10’ são os parâmetros que devem ser escritos no arquivo.

Sobre esta função é importante mencionar a importância de se especificar o formato dos números escritos no arquivo de saída. Um exemplo está dado a seguir:

```

*vwrite,R(1,1) , R(2,1) , R(3,1) , R(4,1) , R(5,1) , R(6,1) ,
R(7,1) , R(8,1) , R(9,1) , R(10,1)
(1x,10(2pe17.5))

```

A primeira linha chama a função e passa os parâmetros que devem ser escritos no arquivo. A segunda linha dá a especificação do formato em que esses parâmetros devem ser escritos (feito através do formato utilizado em linguagem FORTRAN).

Dentre os comandos utilizados no MATLAB, convém mencionar o ‘DLMREAD’, cuja sintaxe é representada a seguir, e que faz a leitura de um arquivo ASCII transcrevendo as informações contidas no mesmo para uma matriz.

```

DADOS = DLMREAD ( 'nomearq' );

```

Onde:

‘DLMREAD’ é a chamada da função;

‘DADOS’ é a matriz que recebe os elementos do arquivo lido;

‘nomearq’ é o nome do arquivo que contém os dados a serem lidos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇIKALIN, T.; RAMAN, A.; GARIMELLA, S.V. Two-Dimensional Streaming Flows Induced By Resonating, Thin Beams. **Journal of The Acoustical Society Of America**. Nova Iorque, v.114, f. 4, p. 1785-1795, out. 2003.

AÇIKALIN, T.; WAIT, S.M., GARIMELLA, S.V., RAMAN, A. Experimental Investigation of The Thermal Performance of Piezoelectric Fans. **Heat Transfer Engineering**. Filadélfia, v. 25, f. 1, jan.-fev. 2004.

ALTAIR. **Altair Hyperstudy**: Optimization Algorithms. Altair Engineering, 2003;

Altair Engineering. ALTAIR. Disponível em <<http://www.altair.com>>. Acesso em 23 fev. 2005.

ANDERSON, J.M.; STREITLIEN, K.; TRIANTAFYLLOU, M.S.; GROSENBAUCH, M.A. Optimal Thrust Development in Oscillating Foils With Application to Fish Propulsion. **Journal of Fluid Mechanics**. v. 7, p. 205-224, 1993.

ANDRADE, A.; BISCEGLI, J.; SOUSA, J.E.; OHASHI, Y.; HEMMINGS, S. GLUECK, J.; KAWAHITO, K.; NOSÉ, Y. Characteristics of a Blood Pump Combining the Centrifugal and Axial Pumping Principles: The Spiral Pump, **Artificial Organs**, Boston, v.20, 6, p. 605-612, jun. 1996.

ANSYS. ANSYS Inc. Disponível em: <<http://www.ansys.com>>. Acesso em 23 fev. 2005.

ANSYS. **ANSYS, Inc. Theory Reference**: Fluid Flow. ANSYS, 2003.

ANSYS. **Examples Supplement for Revision 5.1**. Swanson Analysis Systems, Inc. 1994.

BAR-COHEN Y.; CHANG Z. Piezoelectrically Actuated Miniature Peristaltic Pump. In: ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS, 8, 2001, Newport, CA, **Anais**. Newport: SPIE, 2001, p. 1-8.

BASAK, S.; RAMAN, A.; GARIMELLA, S.V. Dynamic Response Optimization of Piezoelectrically Excited Thin Resonant Beams. **Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME**, v.127, f.1, p. 18-27, 2005.

BATHE, K. **Finite Element Procedures**. ed. 1, New Jersey, Prentice Hall, 1995.

BORGEN, M.G.; WASHINGTON, G.N.; KINZEL, G.L. Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicle. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 8, f. 1, p. 66-76, 2003.

BURGEEEN, G.W.; ANTAKI, J.F.; WU, Z.J.; HOLMES, A.J. Computational Fluid Dynamics as a Development Tool for Rotary Blood Pumps. **Artificial Organs**. Malden. v. 25, f. 5, p. 336-340. mai. 2001.

BÜRMANN, P.; RAMAN, A.; GARIMELLA, S.V. Dynamics and Topology Optimization of Piezoelectric Fans. **Transactions on Components And Packaging Technologies**. Nova Iorque, v. 25, f. 4, p. 592-600, dez. 2002.

CFDRC. **Engineering Simulations Softwares, Services, R&D**. Huntsville, Alabama. Disponível em <<http://www.cfdrc.com/>> . Acesso em: 05 de fev. 2005.

DRUCKER, E.G.; LAUDER, G.V. Locomotor Function of The Dorsal Fin in Teleost Fishes: Experimental Analysis Of Wake Forces in Sunfish. **The Journal of Experimental Biology**, Cambridge, v. 204, p. 2943-2959, jun. 2001.

FOX, R.W.; MCDONALD, A.T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1992.

Fluent. Fluent Inc. Disponível em: <<http://www.fluent.com>>. Acesso em 24 fev. 2005.

FLUENT. **User's Guide**, Lebanon. Fluent Inc, fev. 2003

GAMBOA, A.R.; MORRIS, C.J.; FORSTER, F.K.; Optimization of the Fixed-Geometry Valve For Increased Micropump Performance. **Proc. ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition**. Washington, v. 259, p. 525-534, nov. 2003.

GOPALKRISHNAN, R.; TRIANTAFYLLOU, M.S.; TRIANTAFYLLOU, G.S.; BARRET, D. Active Vorticity Control in a Shear Flow Using a Flapping Foil. **Journal of Fluid Mechanics**. v. 274, p. 1-21, 1994.

GULICH, J.F. Impact of Three-Dimensional Phenomena on the design of Rotodynamic Pumps. **Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part-C Journal of Mechanical Engineering Science**. Suffolk. v. 213, f. 1, p. 59-70. 1999

HAFTKA, R. T., GÜRDAL, Z. E KAMAT, M. P. **Elements of Structural Optimization**. Kluwer Academic Publishers, 1990.

HESTENES, M.R.; STIEFEL, E. Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear Systems. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**. V. 49, f. 6, p. 409-436, 1952.

HOLTSMARK, J.; JOHNSEN, I.; SIKKELAND, T.; SKAVLEM, S. Boundary Layer Flow Near a Cylindrical Obstacle in an Oscillating Incompressible Fluid.

Journal of the Acoustical Society of America. Woodbury, v. 26, f. 1, p. 26-39, 1954.

HUERTA, A.; LIU, W.K. Viscous-Flow With Large Free-Surface Motion. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering.** v. 69, f. 3, p. 277-324, ago. 1988.

IHARA, A.; WATANABE, H. On The Flow Around Flexible Plates, Oscillating With Large-Amplitude. **Journal of Fluids and Structures.** Londres, v. 8, f. 6, p. 601-619, ago. 1994.

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

KAR, S.; MCWHORTER, S.; FORD, S.M.; SOPER, S.A. Piezoelectric Mechanical Pump With Nanoliter Per Minute Pulse-Free Flow Delivery For Pressure Pumping In Micro-Channels. **Analyst,** Cambridge, v. 123, f. 7, p. 1435-1441, jul. 1998.

KATO, T.; KAWANO, S.; NAKAHASHI, K.; YAMBE, T.; NITTA, S.I.; HASHIMOTO, H. Computational Flow Visualization in Vibrating Flow Pump Type Artificial Heart by Unstructured Grid. **Artificial Organs.** Malden, v. 27, f. 1, p. 41-48, jan. 2003.

KIM, Y.H.; WERELEY, S.T.; CHUN, C.H. Phase-Resolved Flow Field Produced By a Cantilever Plate Between Two Endplates. **Physics of Fluids.** Pohang, v. 16, f. 1, p. 145-162, jan. 2004.

KOCH, M.; HARRIS, N.; EVANS, A.G.R.; WHITE, N.M.; BRUNNSCHWEILER, A. A Novel Micromachined Pump Based On Thick-Film Piezoelectric Actuation. **Sensors and Actuators A-Physical,** Lausanne, v. 70, f. 1-2, p. 98-103, out. 1998.

KURIBAYASHI, M.; UEHA, S.; MORI, E. Excitation Conditions of Flexural Waves For a Reversible Ultrasonic Linear Motor. **Journal of The Acoustical Society of America**. Woodbury, v. 77, f. 4, p. 1431-1435, abr. 1985.

LASER, D.J.; SANTIAGO, J.G. A Review of Micropumps, **Journal of Micromechanics and Microengineering**, Bristol, v. 14, f.6, p. 35-64, jun. 2004.

LAUNDER, B.E.; SPALDING, D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows. **Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering**. v.3, p. 269-289, mar. 1974.

LIGHTHILL, M.J. Hydromechanics of Aquatic Animal Propulsion. **Ann. Rev. Fluid. Mech.**, v.1, p. 413-466, 1969.

LO, D.C.; YOUNG, D.L. Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Analysis of Free Surface Flow Using a Velocity-Vorticity Formulation. **Journal of Computational Physics**. v. 195, f. 1, p. 175-201, mar. 2004.

LOH, B.G.; HYUN, S.; RO, P.I.; KLEINSTREUER, C. Acoustic Streaming Induced By Ultrasonic Flexural Vibrations and Associated Enhancement of Convective Heat Transfer. **Journal of the Acoustical Society of America**. Melville, v. 111, f. 2, p. 875-883, fev. 2002.

MALCEVIC, I.; GHATTAS, O. Dynamic-Mesh Finite Element Method for Lagrangian computational fluid dynamics. **Finite Elements In Analysis and Design**. Amsterdam. v. 38, f. 10, p. 965-982, ago. 2002.

MALISKA, C.R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro, Brasil. Livros Técnicos e Científicos. 1995

MIYAZAKI, S.I.; KAWAI, T.; ARARAGI, M. A Piezo-Electric Pump Driven By a Flexural Progressive Wave. In: IEEE-MEMS Workshop, 1991, Nara, **Anais.** IEEE, 1991, p. 283-288.

MU, Y.H.; HUNG, N.P.; NGOI, K.A. Optimisation Design of a Piezoelectric Micropump. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology.** Surrey, v. 15, f. 8, p. 573-576, 1999.

Multidisciplinary Engineering Solutions. CFD Research Corporation. Disponível em <<http://www.cfdrc.com>> Acesso em 23 fev. 2005.

MYERS, R.H.; MONTGOMERY, D.C. **Response Surface Methodology.** New York, John Wiley & Sons. 1995.

NADER, G. **Desenvolvimento de técnicas de caracterização de transdutores piezelétricos.** 2002. 160p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

NAKAMURA, K.; KUROSAWA, M.; UEHA, S. Characteristics of a Hybrid Transducer-Type Ultrasonic Motor. **IEEE Transactions On Ultrasonics Ferroelectrics And Frequency Control.** Nova Iorque, v. 38, f. 3, p. 188-193, mai. 1991.

NAKASONE, P.H.; PIRES, R.F.; SILVA, E.C.N. Análise de Viabilidade de uma Bomba de Fluxo Piezelétrica. In: XV Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2004). **Anais.** Gramado. Setembro de 2004.

NAKASONE, P.H.; PIRES, R.F.; LIMA, C.R.; SILVA, E.C.N. Computational Simulation of a Piezoelectric Pump. In: XXVI CILAMCE – Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. **Anais.** Guarapari. Outubro de 2005.

NGUYEN, N.T.; TRUONG, T.Q. A Fully Polymeric Micropump With Piezoelectric Actuator. **Sensors And Actuators B-Chemical**. Lausanne, v. 70, f. 1, p. 139-145, jan. 2004.

NYBORG, W.L. Acoustic Streaming due to Attenuated Plane Waves. **Journal of the Acoustical Society of America**. Woodbury, v.25, f.1, p. 68-75, 1953.

NYBORG, W.L. Acoustic Streaming Near a Boundary. **Journal of the Acoustical Society of America**. Woodbury, v.30, f.4, p. 329-339, 1958.

OESTREICHER, H.L. Field and Impedance of an Oscillating Sphere in a Viscoelastic Medium with an Application to Biophysics. **Journal of the Acoustical Society of America**. Woodbury, v.23, f. 6, p. 707-714, 1951.

OKAMOTO, E.; HASHIMOTO, T.; INOUE, T.; MITAMURA, Y. Blood Compatible Design of a Pulsatile Blood Pump Using Computational Fluid Dynamics and Computer-Aided Design and Manufacturing Technology. **Artificial Organs**. Malden, v. 27, f. 1, p. 61-67, jan. 2003.

OLSSON, A.; STEMME, G.; STEMME, E.; Numerical and Experimental Studies of Flat-Walled Diffuser Elements for Valve-Less Micropumps. **Sensors and Actuators A-Physical**. Lausanne, v.84, f.1-2, p. 165-175, ago. 2000.

PATANKAR, S.V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. ed. 1, Londres, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

PEDLEY, T.J.; HILL, S.J. Large-Amplitude Undulatory Fish Swimming: Fluid Mechanics Coupled To Internal Mechanics. **The Journal of Experimental Biology**, Cambridge, v. 202, p. 3431-3438, nov. 1999.

PIRES, R.F.; NAKASONE, P.H. CUNHA, M.R.; ANDRADE, A.J.P.; LIMA, C.R.; SILVA, E.C.N. Mechatronic Pump Characterization: The Mech-Pump. In: COBEM

2005 – 18th International Congress of Mechanical Engineering. **Anais**. Ouro Preto. Novembro de 2005.

PIRES, R.F.; NAKASONE, P.H.; LIMA, C.R.; SILVA, E.C.N. A miniature bimorph piezoelectrically actuated flow pump. In: Proceedings of the SPIE 13th Annual Symposium on Smart Structures and Materials. **Anais**. 2006.

PIRES, R.F.; NAKASONE, P.H.; SILVA, E.C.N. Estudo de Viabilidade de uma Bomba de Fluxo Piezelétrica. In: 3º Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais (COLAOB). **Anais**. Campinas, Julho de 2004.

RANEY, W.P.; CORELLI, J.C.; WESTERVELT, P.J. Acoustical Streaming in the Vicinity of a Cylinder. **Journal of the Acoustical Society of America**. Woodbury, v. 26, f. 6, p. 1006-1014, 1954.

RILEY, N. Steady Streaming. **Annual Review of Fluid Mechanics**. v.33, p. 43-65, 2001.

RISTIK, V.M. **Principles of Acoustic Devices**. New York. John Wiley & Sons. 1983

ROSEN, M.W. **Water Flow About a Swimming Fish**. China Lake, CA, US Naval Ordnance Test Station TP 2298, p.96, 1959.

SASHIDA, T; KENJO, T. **An Introduction to Ultrasonic Motors**. Clarendon Press. Oxford. 1993

SFAKIOTAKIS, M.; LANE, D.M.; DAVIES, J.B.C. Review of Fish Swimming Modes For Aquatic Locomotion. **Journal of Oceanic Engineering**, Nova Iorque, v. 24, f. 2, p. 237-252, abr. 1999.

SHIRAHIGE, A.B.; SILVA, E.C.N. **Determinação de Amplitude de Vibração de Transdutores Piezelétricos por Interferometria Laser**. São Paulo: EPUSP, 2002. (Relatório de Iniciação Científica)

SILVA, E.C.N. **Modelagem Vibracional de Transdutores de Ultra-som Piezelétricos pelo Método de Elementos Finitos**. 1993. 107p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1993.

SONG, X.W.; THROCKMORTON, A.L.; WOOD, H.G.; ANTAKI, J.F.; OLSEN, D.B. Computational Fluid Dynamics Prediction of Blood Damage in a Centrifugal Pump. **Artificial Organs**. v. 27, f.10, p. 938-941. 2003.

SONG, X.; WOOD, H.G.; OLSEN, D. Computational Fluid Dynamics (CFD) Study Of The 4th Generation Prototype Of A Continuous Flow Ventricular Assist Device (VAD). **Journal of Biomechanical Engineering-Transactions Of The ASME**. Nova Iorque, v. 126, f. 2, p. 180-187, abr. 2004.

TEYMOORI, M.M.; ABBASPOUR-SANI, E. Design and Simulation of a novel Electrostatic Peristaltic Micromachined Pump for Drug Delivery Applications, **Sensors and Actuator A-Physical**, Lausanne, v.117, f.2, p. 222-229, jan. 2005.

TRYANTAFYLLOU, G.S.; TRYANTAFYLLOU, M.S; GROSENBAUGH, M.A. Optimal Thrust Development In Oscillating Foils With Application To Fish Propulsion. **Journal of Fluids and Structures**, Londres, v. 7, p. 205-224, fev. 1993.

UEHA, S.; TOMIKAWA, Y.; KUROSAWA, M.; NAKAMURA, N. **Ultrasonic Motors – Theory and Application**. Clarendon Press. Oxford. 1993.

ULLMAN, A.; FONO, I.; TAITEL, Y. A Piezoelectric Valve-Less Pump-Dynamic Model. **Journal of Fluids Engineering**, Cambridge, v. 123, p. 92-98, mar. 2001.

VANDERPLATZ, G. **Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: with Applications**. McGraw-Hill, New York, EUA, 1984.

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method**. Prentice Hall, New York, EUA, 1995

VIDELER, J.J. **Fish Swimming**. Londres, Chapman & Hall, 1993.

VIDELER, J.J.; MÜLLER, U.K.; STAMHUIS, E.J. Aquatic Vertebrate Locomotion: Wakes From Body Waves. **The Journal of Experimental Biology**, Cambridge, v. 202, p. 3423-3430, nov. 1999.

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**. Amsterdã. v. 168, f. 1-2, p. 491-499, jul. 2004.

YANO, T.; SEKINE, K.; MITOH, A.; MITAMURA, Y.; OKAMOTO, E.; KIM, D.W.; NISHIMURA, I.; MURABAYASHI, S.; YOZU, R. An Estimation Method of Hemolysis Within an Axial Flow Blood Pump by Computational Fluid Dynamics Analysis. **Artificial Organs**. Malden, v. 27, f. 10, p. 920-925, out. 2003.

WAN, Q.; KUZNETSOV, A.V. Effect of non-uniformity of source vibration amplitude on the sound field wave number, attenuation coefficient and Reynolds stress for the acoustic streaming. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Oxford, v.30, f.1, p. 27-36, jan. 2003.

WAN, Q.; KUZNETSOV, A.V. Numerical Study of the Efficiency of Acoustic Streaming for Enhancing Heat Transfer between Two Parallel Beams. **Flow Turbulence and Combustion**. Dordrecht, v. 70, f. 1-4, p. 89-114, 2003.

WESTERVELT, P.J. The Theory of Steady Rotational Flow Generated by a Sound Field. **Journal of the Acoustical Society of America**. Woodbury, v.25, f.1, p. 60-67, 1953.

10. APÊNDICE

10.1. Rotina em APDL para simulação do “Piezoelectric Fan” no ANSYS

```
/BATCH,LIST
/tit,Piezofan
/nopr

RHO   = 1.225           ! Densidade
MU    = 0.0179e-3       ! Viscosidade
PASSOS = 6000           ! Passos
ITERACS = 200           ! Iteracoes por passos
TEMPO = 0.20            ! Tfinal da simulação
DELTA  = TEMPO/PASSOS!

/CONFIG,NRES,10000

!--
!
! ANSYS input
!
:FUNC
*DIM,DESLOC_Y, TABLE,6,58,3
!
! Begin of equation: {X}
DESLOC_Y(0,0,1)= 0.0, -999
DESLOC_Y(2,0,1)= 0.0
...
DESLOC_Y(0,57,3)= 0.0, -3, 0, 1, -2, 3, -1
DESLOC_Y(0,58,3)= 0.0, 99, 0, 1, -3, 0, 0
! End of equation: 0.0008*(-0.4742*cos(49.4542*{X})+(1.7902/2)*(exp(49.4542*
! {X}))+exp(- 49.4542*{X}))-0.3694*sin(49.4542*{X})-(1.75577/2)*(exp(49.4542*
! {X}))- exp(-49.4542*{X}))*sin(2*3.14159*60*{TIME})
!-->

!--
!
! ANSYS input
!
:FUNC
*DIM,VELOC_Y, TABLE,6,64,3
!
! Begin of equation: {X}
VELOC_Y(0,0,1)= 0.0, -999
```

```

VELOC_Y(2,0,1)= 0.0
...
VELOC_Y(0,63,3)= 0.0, -2, 0, 1, -3, 3, -1
VELOC_Y(0,64,3)= 0.0, 99, 0, 1, -2, 0, 0
! End of equation: 0.0008*(-0.4742*cos(49.4542*{X})+(1.7902/2)*(exp(49.4542*
! {X})+exp(- 49.4542*{X}))-0.3694*sin(49.4542*{X})-(1.75577/2)*(exp(49.4542*
! {X})- exp(-49.4542*{X}))*cos(2*3.14159*60*{TIME})*2*3.14159*60
!-->

/PREP7 $smrt,off
et,1,141 ! Elemento Fluid141
keyopt,1,4,1

K, 1, -0.15, 0
K, 2, 0, 0
...
K, 29, 0.45, 0.05
K, 30, 0.45, 0

L, 1, 2 ! Linha 01
L, 2, 3 ! Linha 02
...
L, 8, 29 ! Linha 48
L, 4, 30 ! Linha 49

AL, 1, 14, 4, 13 ! Area 1
AL, 2, 15, 5, 14 ! Area 2
...
AL, 35, 47, 20, 48 ! Area 19
AL, 49, 36, 48, 16 ! Area 20

lesize, 1, 0.0007
lesize, 2, 0.0005
...
lesize, 48, 0.0100
lesize, 49, 0.0100

alls
amesh, all

lssel,s,,,1 ! Parte inferior
lssel,a,,,3

```

```

lssel,a,,,37
lssel,a,,,49
nsll,s,1
d,all,vx,0.0
d,all,vy,0.0
d,all,ux,0.0
d,all,uy,0.0

lssel,s,,,25                                ! Lateral esquerda
lssel,a,,,26
lssel,a,,,27
lssel,a,,,28
nsll,s,1
d,all,ux,0.0
d,all,uy,0.0
d,all,vx,0.0
d,all,vy,0.0

lssel,s,,,33                                ! Lateral direita
lssel,a,,,34
lssel,a,,,35
lssel,a,,,36
nsll,s,1
d,all,ux,0.0
d,all,uy,0.0
d,all,vx,0.0
d,all,vy,0.0

lssel,s,,,41                                ! Parte superior
lssel,a,,,42
lssel,a,,,43
lssel,a,,,44
lssel,a,,,45
nsll,s,1
d,all,ux,0.0
d,all,uy,0.0
d,all,vx,0.0
d,all,vy,0.0

lssel,s,,,2                                ! Atuador Bilaminar
nsll,s,1
d,all,VX,0.0
d,all,VY,%VELOC_Y%
d,all,enke,-1                                ! Indicacao Fronteira Movel
d,all,ux,0.0
d,all,uy,%DESLOC_Y%

alls

```

```

fini

/SOLU
FLDA,NOMI,DENS,RHO          ! densidade
FLDA,NOMI,VISC,UM           ! viscosidade
flda,quad,momd,2
flda,quad,moma,2
flda,quad,moms,2
flda,quad,prsd,2
flda,quad,prss,2
flda,solu,tran,t
flda,time,step,DELTA
flda,time,numb,PASSOS
flda,time,tend,TEMPO
flda,time,glob,ITERACS
flda,time,appe,appf

flda,solu,ale,t              ! Formulacao ALE
flda,solu,turb,t            ! Escoamento Turbulento

fldata37, algr, segr, simplen      ! Algoritmo de acoplamento SIMPLEN
fldata18, meth, enke, 4
fldata18, meth, ends, 4
fldata18, meth, pres, 2
fldata18, meth, temp, 4
fldata18, meth, vx, 5
fldata18, meth, vy, 5

save
SOLVE
fini

```

10.2. Rotina em C para aplicação das condições de contorno no “Fluent”

```

#include "stdio.h"
#include "udf.h"
#define PI 3.14159265359

DEFINE_GRID_MOTION(lamina, domain, dt, time, dtime)
{
    Thread *tf = DT_THREAD (dt);
    face_t f;
    Node *v;
    real Amplitude;
    real Freq;

```

```

real omega;
real origem_x;
real origem_y;
real l_atuador;
real posicao_x;
real posicao_y;
real posicao_z;
real x_aux;

real L1;
real L2;
real a1;
real a2;
real a3;
real a4;
real a5;
real a6;
real a7;
real a8;
real b1;
real b2;

real NV_VEC (posicao);
int n;

Amplitude = 0.0008;    // Amplitude (pico-a-pico = Amplitude * 2)
Freq       = 60;      // Frequencia (Hz)
omega      = 2 * PI * Freq;
origem_x   = 0.0; // Ponto inicial do atuador x
origem_y   = 0.0; // Ponto inicial do atuador y
posicao_x   = 0.0; // Posicao x do nó
posicao_y   = 0.0; // Posicao y do nó
posicao_z   = 0.0; // Posicao z do nó
x_aux      = 0.0;    // Variavel auxiliar
L1         = 0.029;   // Comprimento L1
L2         = 0.065;   // Comprimento L2
a1         = 0.072861;
a2         = 0.015744;
a3         = -0.0886;
a4         = 0.05711;
a5         = -0.4742;
a6         = 1.7902;
a7         = -0.3694;
a8         = -1.75577;
b1         = 32.8682;
b2         = 49.4542;

```



```

begin_f_loop (f, tf)
{
    f_node_loop (f, tf, n)
    {
        v = F_NODE(f, tf, n);

        if (NODE_X(v) > origem_x && NODE_POS_NEED_UPDATE(v))
        {
            NODE_POS_UPDATED(v);

            x_aux = NODE_X(v) - origem_x;

            if ( x_aux < L1 )
            {
                posicao_y = a1*exp(-b1*x_aux) + a2*exp(b1*x_aux) +
a3*cos(b1*x_aux) + a4*sin(b1*x_aux);
            }
            else
            {
                posicao_y = a5*cos(b2*x_aux) + a6*cosh(b2*x_aux) +
a7*sin(b2*x_aux) + a8*sinh(b2*x_aux);
            }

            posicao_y = posicao_y * Amplitude * sin (omega * time);
            posicao_x = NODE_X(v);

            NV_D (posicao, = , posicao_x, posicao_y, posicao_z);
            NV_V (NODE_COORD(v), = , posicao);

        }
    }
}
end_f_loop (f,tf);
}

```

10.3. Rotina em APDL para simulação da Bomba Piezelétrica no ANSYS

```
/BATCH,LIST
/tit,Piezopump
/nopr

RHO      = 1000.0000      ! Densidade
MU        = 0.001         ! Viscosidade
PASSOS    = 100000        ! Passos
ITERACS    = 200          ! Iteracoes por passos
P_INP     = 0             ! Pressao na Entrada da Bomba
P_OUT     = 0             ! Pressao na Saída da Bomba

L_atuador  = 0.040 ! Comprimento do Atuador
L_entrada  = 0.001 ! Comprimento da Entrada
L_saida    = 0.015 ! Comprimento da regioao de saida

H_duto     = 0.0040          ! Altura do duto
ampl       = 0.30            ! 1 = 100V ou 20Vpp (equivalente obtido de análise
acústica)
                                ! 0.30 = 60Vpp (equivalente ao máximo experimental)

freq       = 278
omega      = freq*2*3.14159    ! Freq = 278Hz
TEMPO      = 2               ! Tfinal da simulação
DELTA      = TEMPO/PASSOS     ! Tamanho do Passo

/CONFIG,NRES,200000

:FUNC
*DIM,DESLOC_Y, TABLE, 6, 30, 3

DESLOC_Y(0,0,1)= 0.0, -999
DESLOC_Y(2,0,1)= 0.0
DESLOC_Y(3,0,1)= 0.0
DESLOC_Y(4,0,1)= 0.0
DESLOC_Y(5,0,1)= 0.0
DESLOC_Y(6,0,1)= 0.0
DESLOC_Y(0,1,1)= 1.0, 99, 0, 1, 2, 0, 0
DESLOC_Y(0,2,1)= 0
DESLOC_Y(0,3,1)= 0
DESLOC_Y(0,4,1)= 0
DESLOC_Y(0,5,1)= 0
DESLOC_Y(0,6,1)= 0
DESLOC_Y(0,7,1)= 0
DESLOC_Y(0,8,1)= 0
```

```

DESLOC_Y(0,9,1)= 0
DESLOC_Y(0,10,1)= 0
DESLOC_Y(0,11,1)= 0
DESLOC_Y(0,12,1)= 0
DESLOC_Y(0,13,1)= 0
DESLOC_Y(0,14,1)= 0
DESLOC_Y(0,15,1)= 0
DESLOC_Y(0,16,1)= 0
DESLOC_Y(0,17,1)= 0
DESLOC_Y(0,18,1)= 0
DESLOC_Y(0,19,1)= 0
DESLOC_Y(0,20,1)= 0
DESLOC_Y(0,21,1)= 0
DESLOC_Y(0,22,1)= 0
DESLOC_Y(0,23,1)= 0
DESLOC_Y(0,24,1)= 0
DESLOC_Y(0,25,1)= 0
DESLOC_Y(0,26,1)= 0
DESLOC_Y(0,27,1)= 0
DESLOC_Y(0,28,1)= 0
DESLOC_Y(0,29,1)= 0
DESLOC_Y(0,30,1)= 0
DESLOC_Y(0,0,2)= 0.004, -999
DESLOC_Y(2,0,2)= 0.0
DESLOC_Y(3,0,2)= 0.0
DESLOC_Y(4,0,2)= 0.0
DESLOC_Y(5,0,2)= 0.0
DESLOC_Y(6,0,2)= 0.0
DESLOC_Y(0,1,2)= 1.0, 99, 0, 0, 0, 0, 0
DESLOC_Y(0,2,2)= 0
DESLOC_Y(0,3,2)= 0
DESLOC_Y(0,4,2)= 0
DESLOC_Y(0,5,2)= 0
DESLOC_Y(0,6,2)= 0
DESLOC_Y(0,7,2)= 0
DESLOC_Y(0,8,2)= 0
DESLOC_Y(0,9,2)= 0
DESLOC_Y(0,10,2)= 0
DESLOC_Y(0,11,2)= 0
DESLOC_Y(0,12,2)= 0
DESLOC_Y(0,13,2)= 0
DESLOC_Y(0,14,2)= 0
DESLOC_Y(0,15,2)= 0
DESLOC_Y(0,16,2)= 0
DESLOC_Y(0,17,2)= 0
DESLOC_Y(0,18,2)= 0
DESLOC_Y(0,19,2)= 0
DESLOC_Y(0,20,2)= 0
DESLOC_Y(0,21,2)= 0

```

```

DESLOC_Y(0,22,2)= 0
DESLOC_Y(0,23,2)= 0
DESLOC_Y(0,24,2)= 0
DESLOC_Y(0,25,2)= 0
DESLOC_Y(0,26,2)= 0
DESLOC_Y(0,27,2)= 0
DESLOC_Y(0,28,2)= 0
DESLOC_Y(0,29,2)= 0
DESLOC_Y(0,30,2)= 0
DESLOC_Y(0,0,3)= 0.040, -999
DESLOC_Y(2,0,3)= 0.0
DESLOC_Y(3,0,3)= 0.0
DESLOC_Y(4,0,3)= 0.0
DESLOC_Y(5,0,3)= 0.0
DESLOC_Y(6,0,3)= 0.0
DESLOC_Y(0,1,3)= 1.0, -1, 0, 0, 0, 0, 0
DESLOC_Y(0,2,3)= 0.0, -2, 0, 1, 0, 0, -1
DESLOC_Y(0,3,3)= 0, -3, 0, 1, -1, 2, -2
DESLOC_Y(0,4,3)= 0.0, -1, 0, 544.446794193917, 0, 0, -3
DESLOC_Y(0,5,3)= 0.0, -2, 0, 1, -3, 3, -1
DESLOC_Y(0,6,3)= 0.0, -1, 0, 4, 0, 0, 2
DESLOC_Y(0,7,3)= 0.0, -3, 0, 1, 2, 17, -1
DESLOC_Y(0,8,3)= 0.0, -1, 0, 1, -2, 3, -3
DESLOC_Y(0,9,3)= 0.0, -2, 0, 3, 0, 0, 2
DESLOC_Y(0,10,3)= 0.0, -3, 0, 1, 2, 17, -2
DESLOC_Y(0,11,3)= 0.0, -2, 0, 042.829415240340, 0, 0, -3
DESLOC_Y(0,12,3)= 0.0, -4, 0, 1, -2, 3, -3
DESLOC_Y(0,13,3)= 0.0, -2, 0, 1, -1, 1, -4
DESLOC_Y(0,14,3)= 0.0, -1, 0, 2, 0, 0, 2
DESLOC_Y(0,15,3)= 0.0, -3, 0, 1, 2, 17, -1
DESLOC_Y(0,16,3)= 0.0, -1, 0, 000.361014431351, 0, 0, -3
DESLOC_Y(0,17,3)= 0.0, -4, 0, 1, -1, 3, -3
DESLOC_Y(0,18,3)= 0.0, -1, 0, 1, -2, 2, -4
DESLOC_Y(0,19,3)= 0.0, -2, 0, 000.012470177997, 0, 0, 2
DESLOC_Y(0,20,3)= 0.0, -3, 0, 1, -2, 3, 2
DESLOC_Y(0,21,3)= 0.0, -2, 0, 1, -1, 2, -3
DESLOC_Y(0,22,3)= 0.0, -1, 0, 5.305523869354788e-005, 0, 0, -2
DESLOC_Y(0,23,3)= 0.0, -3, 0, 1, -2, 1, -1
DESLOC_Y(0,24,3)= 0.0, -1, 0, ampl, 0, 0, -3
DESLOC_Y(0,25,3)= 0.0, -2, 0, 1, -1, 3, -3
DESLOC_Y(0,26,3)= 0.0, -1, 0, omega, 0, 0, 1
DESLOC_Y(0,27,3)= 0.0, -3, 0, 1, -1, 3, 1
DESLOC_Y(0,28,3)= 0.0, -1, 9, 1, -3, 0, 0
DESLOC_Y(0,29,3)= 0.0, -3, 0, 1, -2, 3, -1
DESLOC_Y(0,30,3)= 0.0, 99, 0, 1, -3, 0, 0

:FUNC
*DIM,VELOC_Y,TABLE,6,32,3
VELOC_Y(0,0,1)= 0.0, -999

```

```

VELOC_Y(2,0,1)= 0.0
VELOC_Y(3,0,1)= 0.0
VELOC_Y(4,0,1)= 0.0
VELOC_Y(5,0,1)= 0.0
VELOC_Y(6,0,1)= 0.0
VELOC_Y(0,1,1)= 1.0, 99, 0, 1, 2, 0, 0
VELOC_Y(0,2,1)= 0
VELOC_Y(0,3,1)= 0
VELOC_Y(0,4,1)= 0
VELOC_Y(0,5,1)= 0
VELOC_Y(0,6,1)= 0
VELOC_Y(0,7,1)= 0
VELOC_Y(0,8,1)= 0
VELOC_Y(0,9,1)= 0
VELOC_Y(0,10,1)= 0
VELOC_Y(0,11,1)= 0
VELOC_Y(0,12,1)= 0
VELOC_Y(0,13,1)= 0
VELOC_Y(0,14,1)= 0
VELOC_Y(0,15,1)= 0
VELOC_Y(0,16,1)= 0
VELOC_Y(0,17,1)= 0
VELOC_Y(0,18,1)= 0
VELOC_Y(0,19,1)= 0
VELOC_Y(0,20,1)= 0
VELOC_Y(0,21,1)= 0
VELOC_Y(0,22,1)= 0
VELOC_Y(0,23,1)= 0
VELOC_Y(0,24,1)= 0
VELOC_Y(0,25,1)= 0
VELOC_Y(0,26,1)= 0
VELOC_Y(0,27,1)= 0
VELOC_Y(0,28,1)= 0
VELOC_Y(0,29,1)= 0
VELOC_Y(0,30,1)= 0
VELOC_Y(0,31,1)= 0
VELOC_Y(0,32,1)= 0
VELOC_Y(0,0,2)= 0.004, -999
VELOC_Y(2,0,2)= 0.0
VELOC_Y(3,0,2)= 0.0
VELOC_Y(4,0,2)= 0.0
VELOC_Y(5,0,2)= 0.0
VELOC_Y(6,0,2)= 0.0
VELOC_Y(0,1,2)= 1.0, 99, 0, 0, 0, 0, 0
VELOC_Y(0,2,2)= 0
VELOC_Y(0,3,2)= 0
VELOC_Y(0,4,2)= 0
VELOC_Y(0,5,2)= 0
VELOC_Y(0,6,2)= 0

```

```

VELOC_Y(0,7,2)= 0
VELOC_Y(0,8,2)= 0
VELOC_Y(0,9,2)= 0
VELOC_Y(0,10,2)= 0
VELOC_Y(0,11,2)= 0
VELOC_Y(0,12,2)= 0
VELOC_Y(0,13,2)= 0
VELOC_Y(0,14,2)= 0
VELOC_Y(0,15,2)= 0
VELOC_Y(0,16,2)= 0
VELOC_Y(0,17,2)= 0
VELOC_Y(0,18,2)= 0
VELOC_Y(0,19,2)= 0
VELOC_Y(0,20,2)= 0
VELOC_Y(0,21,2)= 0
VELOC_Y(0,22,2)= 0
VELOC_Y(0,23,2)= 0
VELOC_Y(0,24,2)= 0
VELOC_Y(0,25,2)= 0
VELOC_Y(0,26,2)= 0
VELOC_Y(0,27,2)= 0
VELOC_Y(0,28,2)= 0
VELOC_Y(0,29,2)= 0
VELOC_Y(0,30,2)= 0
VELOC_Y(0,31,2)= 0
VELOC_Y(0,32,2)= 0
VELOC_Y(0,0,3)= 0.040, -999
VELOC_Y(2,0,3)= 0.0
VELOC_Y(3,0,3)= 0.0
VELOC_Y(4,0,3)= 0.0
VELOC_Y(5,0,3)= 0.0
VELOC_Y(6,0,3)= 0.0
VELOC_Y(0,1,3)= 1.0, -1, 0, 0, 0, 0, 0
VELOC_Y(0,2,3)= 0.0, -2, 0, 1, 0, 0, -1
VELOC_Y(0,3,3)= 0, -3, 0, 1, -1, 2, -2
VELOC_Y(0,4,3)= 0.0, -1, 0, 544.446794193917, 0, 0, -3
VELOC_Y(0,5,3)= 0.0, -2, 0, 1, -3, 3, -1
VELOC_Y(0,6,3)= 0.0, -1, 0, 4, 0, 0, 2
VELOC_Y(0,7,3)= 0.0, -3, 0, 1, 2, 17, -1
VELOC_Y(0,8,3)= 0.0, -1, 0, 1, -2, 3, -3
VELOC_Y(0,9,3)= 0.0, -2, 0, 3, 0, 0, 2
VELOC_Y(0,10,3)= 0.0, -3, 0, 1, 2, 17, -2
VELOC_Y(0,11,3)= 0.0, -2, 0, 042.829415240340, 0, 0, -3
VELOC_Y(0,12,3)= 0.0, -4, 0, 1, -2, 3, -3
VELOC_Y(0,13,3)= 0.0, -2, 0, 1, -1, 1, -4
VELOC_Y(0,14,3)= 0.0, -1, 0, 2, 0, 0, 2
VELOC_Y(0,15,3)= 0.0, -3, 0, 1, 2, 17, -1
VELOC_Y(0,16,3)= 0.0, -1, 0, 000.361014431351, 0, 0, -3
VELOC_Y(0,17,3)= 0.0, -4, 0, 1, -1, 3, -3

```

```

VELOC_Y(0,18,3)= 0.0, -1, 0, 1, -2, 2, -4
VELOC_Y(0,19,3)= 0.0, -2, 0, 000.012470177997, 0, 0, 2
VELOC_Y(0,20,3)= 0.0, -3, 0, 1, -2, 3, 2
VELOC_Y(0,21,3)= 0.0, -2, 0, 1, -1, 2, -3
VELOC_Y(0,22,3)= 0.0, -1, 0, 5.305523869354788e-005, 0, 0, -2
VELOC_Y(0,23,3)= 0.0, -3, 0, 1, -2, 1, -1
VELOC_Y(0,24,3)= 0.0, -1, 0, ampl, 0, 0, -3
VELOC_Y(0,25,3)= 0.0, -2, 0, 1, -1, 3, -3
VELOC_Y(0,26,3)= 0.0, -1, 0, omega, 0, 0, 1
VELOC_Y(0,27,3)= 0.0, -3, 0, 1, -1, 3, 1
VELOC_Y(0,28,3)= 0.0, -1, 10, 1, -3, 0, 0
VELOC_Y(0,29,3)= 0.0, -3, 0, 1, -2, 3, -1
VELOC_Y(0,30,3)= 0.0, -1, 0, omega, 0, 0, -3
VELOC_Y(0,31,3)= 0.0, -2, 0, 1, -3, 3, -1
VELOC_Y(0,32,3)= 0.0, 99, 0, 1, -2, 0, 0

```

```

/PREP7 $smrt,off
et,1,141 ! Elemento Fluid141
keyopt,1,4,1

```

```

K, 1, 0.000, 0
K, 2, L_entrada, 0
K, 3, L_atuador, 0
K, 4, L_atuador + L_saida, 0
K, 5, L_atuador + L_saida, H_duto/2
K, 6, L_atuador + L_saida, H_duto
K, 7, L_atuador, H_duto
K, 8, L_entrada, H_duto
K, 9, 0, H_duto
K, 10, 0, H_duto/2
K, 11, L_atuador, H_duto/2

```

```

L, 1, 2 ! Linha 01
L, 2, 3 ! Linha 02
L, 3, 4 ! Linha 03
L, 4, 5 ! Linha 04
L, 5, 6 ! Linha 05
L, 6, 7 ! Linha 06
L, 7, 8 ! Linha 07
L, 8, 9 ! Linha 08
L, 9, 10 ! Linha 09
L, 10, 1 ! Linha 10
L, 10, 11 ! Linha 11
L, 7, 11 ! Linha 12
L, 11, 3 ! Linha 13

```

```

AL, 1, 2, 13, 11, 10      ! Area 1
AL, 11, 12, 7, 8, 9      ! Area 2
AL, 12, 13, 3, 4, 5, 6  ! Area 3

lesize, 1, 0.00025
lesize, 2, 0.00060
lesize, 3, 0.00060
lesize, 4, 0.00020
lesize, 5, 0.00020
lesize, 6, 0.00060
lesize, 7, 0.00060
lesize, 8, 0.00025
lesize, 9, 0.00025
lesize, 10, 0.00025
lesize, 11, 0.00025
lesize, 12, 0.00025
lesize, 13, 0.00025

alls
mshape,1
amesh, all

lselect,s,,,2              ! Parte inferior
lselect,a,,,3
lselect,a,,,10
nsll,s,1
d,all,vx,0.0
d,all,vy,0.0
d,all,ux,0.0
d,all,uy,0.0

lselect,s,,,6              ! Parte superior
lselect,a,,,7
lselect,a,,,9
nsll,s,1
d,all,ux,0.0
d,all,uy,0.0
d,all,vx,0.0
d,all,vy,0.0

lselect,s,,,1              ! Entrada de Fluido
lselect,a,,,8
nsll,s,1
d,all,pres,P_INP

lselect,s,,,4

```



```

lssel,a,,,5
nsll,s,1
d,all,pres,P_OUT

lssel,s,,,11                                ! Atuador Bilaminar
nsll,s,1
d,all,VX,0.0
d,all,VY,%VELOC_Y%
d,all,enke,-1                                ! Indicacao Fronteira Movel
d,all,ux,0.0
d,all,uy,%DESLOC_Y%

alls
fini

/SOLU
FLDA,NOMI,DENS,RHO                          ! densidade
FLDA,NOMI,VISC,UM                           ! viscosidade
flda,quad,momd,2
flda,quad,moma,2
flda,quad,moms,2
flda,quad,prsd,2
flda,quad,prss,2
flda,solu,tran,t
flda,time,step,DELTA
flda,time,numb,PASSOS
flda,time,tend,TEMPO
flda,time,glob,ITERACS
flda,time,appe,10*DELTA                     ! Salva o resultado a cada 10 time steps

flda,solu,ale,t                             ! Formulacao ALE
flda,solu,turb,t                           ! Escoamento Turbulento

!fldata18, meth, enke, 4
!fldata18, meth, ends, 4
!fldata18, meth, pres, 2
!fldata18, meth, temp, 0
!fldata18, meth, vx, 5
!fldata18, meth, vy, 5

FLDATA5,  OUTP, YPLU, T                    ! Armazena valor de Y-Plus

FLDATA33, ADVN, MOME, SUPG                  ! Streamline Upwind/Petro-Galerkin
FLDATA33, ADVN, TURB, SUPG
FLDATA33, ADVN, PRES, SUPG

!fldata37, algr, segr, simplen              ! Algoritmo de acoplamento SIMPLEN

```

```

save
SOLVE
fini

/post1

N      = 10000
NCICLO = 9999

*dim, VMED, array, 1,1
*cfdopen, res2s, txt

set,,aux*10
nset,s,loc,x,(L_atuador+L_saida)*0.999,(L_atuador+L_saida)*1.001
*get,NNUMMAX,node,,num,max           ! Pega numero de nos (maximo)
*get,NNOS,node,,count                ! Pega o numero de nos selecionados
*del,NMASK
*del,NARRAY
*dim,NMASK,array,NNUMMAX
*dim,NARRAY,array,NNUMMAX,2
*vget,NMASK(1),node,1,nset

*do,aux,N-NCICLO,N

set,,aux*10

*vmask,NMASK(1)
*vget,NARRAY(1,1),node,1,v,x
*vfil,NARRAY(1,2),ramp,1,1

VMED(1,1)=0.0

*do,aux1,1,NNUMMAX

! media = ( 0.5*V(1) + V(2) + V(3) + ... + V(20) + 0.5*V(21) ) / 20
! mas V(1) e V(21) = 0 ... 0.5 * 0.0 = 0.0
! (tanto faz... multiplicar por 0.5 ou nao)

VMED(1,1) = VMED(1,1) + NARRAY(aux1,1)

*enddo

VMED(1,1) = VMED(1,1)/(NNOS-1)
VMED(1,1) = VMED(1,1)*60*1000000*0.020*H_duto
*vwrite,VMED(1,1)
(1x,1(2pe17.5))

*enddo
*cfclos

```