

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

BRUNO TSUNASHIMA ENACHEV - 8583110
RAFAEL HUK DA CRUZ - 8583339

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA
PIEZELÉTRICA TUBULAR DE FLUXO BASEADA EM
MOVIMENTOS OSCILATÓRIOS**

São Paulo
2018

BRUNO TSUNASHIMA ENACHEV - 8583110
RAFAEL HUK DA CRUZ - 8583339

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA
PIEZELÉTRICA TUBULAR DE FLUXO BASEADA EM
MOVIMENTOS OSCILATÓRIOS**

Este relatório é apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecatrônico na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É o produto do meu próprio trabalho, exceto onde indicado no texto. O relatório pode ser livremente copiado e distribuído desde que a fonte seja citada

Orientador: Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva

São Paulo, 13 de novembro de 2018

DEDICATÓRIA

À Deus

À Carolina Viscovini de Araujo Gomes; Ester Tsunashima; Felipe Tsunashima Enachev; Gilmar Antonio Alves da Cruz; Maria Deonete Huk Cruz; Milton Tsunashima; Rogério Martins Enachev que investiram tempo, recursos e não mediram esforços para que estivéssemos onde estamos. Dedicamos esse trabalho e essa formação a vocês.

AGRADECIMENTOS

Ao Curso de Mecatrônica da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de aprendizado e crescimento.

À turma de Mecatrônica 2013 pelas alegrias e estresses passados juntos.

Aos professores pelos ensinamentos. Agradecemos especificamente ao professor Emilio Carlos Nelli Silva pela orientação no trabalho de conclusão de curso e aos professores Paulo Carlos Kaminski, Eduardo de Senzi Zancul, pela dedicação, orientação e confiança nas pesquisas científicas.

À Equipe de robótica Thunderatz pelo aprendizado incrível proporcionado na aplicação prática da engenharia.

Agradecemos aos departamentos PMR, PME e Laboratórios de Fenômenos de Superfície LFS, Ultrassom, Sistemas multifísicos e otimização MSOL, ao Robson Leite da EDM Brasil, por disponibilizarem o material e acesso à equipamentos necessários. Agradecemos ao professor Flávio Buiochi, ao doutorando Ruben Andres Salas Varela e ao mestrando Francisco Helio Alencar Oliveira, pelo auxílio teórico do trabalho. Aos técnicos Carlos Alberto de Souza Lima, Cassio Junqueira da Silva, Cicero Cilanio Cruz, Rafael de Almeida Melchior, Raphael Oliveira Ferreira, pela ajuda imprescindível na usinagem e ensaio dos protótipos do trabalho de conclusão.

RESUMO

As bombas piezelétricas centrífugas tubulares apresentam um grande potencial em mercados biotecnológicos, químicos, medicinais, pois, atendem necessidades como precisão, não influência química ou física no fluido, dimensões reduzidas e baixo custo. Este trabalho apresenta a modelagem computacional de dois tipos de bombas piezelétricas centrífugas tubulares. Essas bombas utilizam como atuador cerâmica piezelétrica que são excitadas na frequência natural de vibração do sistema ou próximas delas. Estas cerâmicas estão acopladas a um tubo de metal que possui uma de suas extremidades presa a uma estrutura maior e outra extremidade livre. Nessa configuração, surgem descolamentos cíclicos, na extremidade livre do tubo de metal e por força centrífuga o líquido no seu interior é expelido para fora. O objetivo deste trabalho é o estudo da metodologia de desenvolvimento de uma bomba centrífuga piezelétrica tubular de fluxo baseada em movimentos oscilatórios de baixo custo. Para este fim, a Modelagem por Elementos Finitos (MEF) será utilizada para avaliação de parâmetros geométricos e construtivos da bomba de fluxo. A etapa final consiste na construção de protótipos e a comparação entre os valores resultantes da modelagem computacional da bomba e os valores reais obtidos com ensaios dos sistemas fabricados. A pesquisa é baseada em um artigo prévio sobre essa tecnologia, na modelagem por elementos finitos e em testes qualitativos do protótipo construído.

ABSTRACT

The tubular centrifugal piezoelectric pumps have great potential in biotech, chemical and medical markets because their characteristics supply needs as precision, not chemical or physical influence in the fluid, small dimensions and low cost. This work presents the computational modeling of two types of tubular centrifugal piezoelectric pumps. These pumps use piezoelectric ceramics as actuators, which are excited at the natural vibration frequency of the system, or close to this value, and are coupled on a metal tube. This tube has one face attached to a structure and the other one is free to move. With this configuration, cyclical movements arouse at the free face of the tube and by centrifugal force the liquid inside is expelled. The main objective of this work is the study of a methodology to develop a low cost piezoelectric centrifugal tubular pump. The Finite Element Method (FEM) will be used for evaluation of geometric and constructive parameters of the flow pump. The final step is the assembly of prototypes and the comparison between the values resulting from the computational modeling of the pump and the actual values obtained with prototype tests. The research is based on a previous article about this technology, on finite element modeling and on qualitative tests of the prototype.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação de bombas	4
Figura 2 - Princípio de funcionamento da bomba de fluxo com configuração do piezelétrico em perpendicular e em paralelo, respectivamente	5
Figura 3 - Estrutura da bomba centrífuga utilizando movimento oscilatório de um tubo de metal	5
Figura 4 - Deformação do material piezelétrico devido a uma tensão elétrica	7
Figura 5 - Surgimento de uma tensão elétrica devido a deformação do material piezelétrico ...	7
Figura 6 – Força centrífuga da bomba	10
Figura 7 – Etapas da modelagem computacional	12
Figura 8 - Modelagem simplificada da bomba	13
Figura 9 – Diagrama e nomenclatura dos sistemas	14
Figura 10 - Sistemas com configuração do piezelétrico em perpendicular e em paralelo, respectivamente	15
Figura 11 - Desenho base para o cilindro	17
Figura 12 - Extrusão da base para a criação do sólido	18
Figura 13 - Desenho base para a pastilha piezelétrica	18
Figura 14 - Extrusão da base para criação do sólido	18
Figura 15 - Indicação das arestas e linhas usados na montagem	19
Figura 16 - Resultado da operação booleana entre o cilindro as pastilhas	19
Figura 17 - Resultado da modelagem da estrutura com piezelétricos em perpendicular da bomba no software SolidWorks	20
Figura 18 - <i>Project Schematic Geometry</i>	20
Figura 19 - <i>Project Schematic</i>	21
Figura 20 - Propriedades do material “Piezo”	21
Figura 21 - Matriz de elasticidade anisotrópica do material “Piezo”	21
Figura 22- Propriedades do material "Cooper"	22
Figura 23 - Modelo da bomba	22
Figura 24- Sub-árvore <i>Geometry</i>	22
Figura 25 - Parametrização de um material à uma peça	23
Figura 26 - Sub-árvore <i>Connections</i>	23
Figura 27 - Área do TuboSimplificado-1 em contato com o piezelétrico	23
Figura 28 - Área do piezelétrico em contato com o TuboSimplificado-1	24
Figura 29 - Parametrização da interação entre dois contatos	24
Figura 30 - Modelo da bomba discretizado	25
Figura 31 - Caracterização do Mesh	25
Figura 32 - Sub-árvore <i>Named Selections</i>	25
Figura 33 - Faces Z_NEG e X_NEG	26
Figura 34 - Faces Z_POS e X_POS	26
Figura 35 - Árvore da análise modal	27
Figura 36 - Parametrização da análise modal	27
Figura 37 - Face do tubo fixa à base	28
Figura 38 - Seleção da face a ser parametrizada	28
Figura 39 - Seleção do “Piezo” como um Piezoelectric Body	28
Figura 40 - Caracterização do “Piezo” como um Piezoelectric Body	29
Figura 41 - Adição da tensão em uma das faces do corpo piezelétrico	29
Figura 42 - Árvore dos parâmetros da análise harmônica	30
Figura 43 - Detalhamento da análise harmônica	30
Figura 44 - Detalhamento de uma das seleções para aplicação da tensão	31

Figura 45 - Seleção de solução	31
Figura 46 - Seleção da geometria	32
Figura 47 - Seleção da geometria no modelo	32
Figura 48 - Seleção da solução complementar	32
Figura 49 - Seleção da geometria	33
Figura 50 - Seleção da geometria no modelo	33
Figura 51 - Árvore dos parâmetros da análise harmônica com estudos complementares	34
Figura 52 - Novo corpo adicionado a simulação	34
Figura 53 - Contato entre o tubo de metal e a água	35
Figura 54 - Designação no corpo como elemento acústico	35
Figura 55 - Determinação das características do fluido	35
Figura 56 - Primeiro modo de vibrar do sistema com piezelétricos em configuração perpendicular	36
Figura 57 - Segundo modo de vibrar do sistema com piezelétricos em configuração perpendicular	37
Figura 58 - Primeiro modo de vibrar do sistema com piezelétricos em configuração paralela	37
Figura 59 - Segundo modo de vibrar do sistema com piezelétricos em configuração paralela	37
Figura 60 - Resposta à frequência do Protótipo “Perpendicular E0,5 L80”	38
Figura 61 - Resposta à frequência do Protótipo “Perpendicular E0,5 L120”	38
Figura 62 - Resposta à frequência do Protótipo “Perpendicular E1,0 L80”	38
Figura 63 - Resposta à frequência do Protótipo “Perpendicular E1,0 L120”	38
Figura 64 - Resposta à frequência do Protótipo “Paralelo E0,5 L80”	36
Figura 65 - Resposta à frequência do Protótipo “Paralelo E0,5 L120”	36
Figura 66 - Resposta à frequência do Protótipo “Paralelo E1,0 L80”	36
Figura 67 - Resposta à frequência do Protótipo “Paralelo E1,0 L120”	36
Figura 68 - Curvas de <i>Lissajous</i> para sistemas estudados (configuração perpendicular)	39
Figura 69 - Curvas de <i>Lissajous</i> para sistemas estudados (configuração paralela)	40
Figura 70 - Protótipo e modelo computacional	43
Figura 71 - Esquemático do ensaio de velocidade e deslocamento	44
Figura 72 - Gerador de Funções (a), Osciloscópio (b) e conjunto Laser-Controlador (c) utilizados	44
Figura 73 - Esquemático das ligações elétricas para a configuração perpendicular (a) e paralelo (b)	45
Figura 74 - Preparação do ensaio, sendo a (a) fixação do protótipo na mesa, (b) nivelamento do laser, (c) foco do laser no papel refletor	46
Figura 75 - Vista superior do protótipo para ilustração do posicionamento do laser para a configuração perpendicular (a) e paralela (b)	46
Figura 76 - Tela do osciloscópio durante os ensaios	47
Figura 77 - Esquemático do ensaio de fluxo	48
Figura 78 - Esquemático da ligação elétrica para a configuração perpendicular	48
Figura 79 - Procedimento de pesagem na balança de precisão do papel absorvente	49
Figura 80 - Primeiro modo de vibrar do protótipo “Paralelo E0,5 L120”, capturado tempo de obturador da câmera maior (a) e um menor (b)	50
Figura 81 - Resposta à frequência real e teórica do protótipo “Perpendicular E0,5 L120”	52
Figura 82 - Resposta à frequência real e teórica do protótipo “Perpendicular E0,5 L80”	53
Figura 83 - Resposta à frequência real e teórica do protótipo “Paralelo E0,5 L120”	53
Figura 84 - Resposta à frequência real e teórica do protótipo “Paralelo E0,5 L80”	54
Figura 85 - Sistema testado com água	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das Geometrias usadas nas modelagens	15
Tabela 2 – Propriedades dos materiais e fluido	16
Tabela 3 – Condições de contorno do sistema	17
Tabela 4 - Tensão aplicadas nas pastilhas piezelétricas	31
Tabela 5 - Frequências naturais dos sistemas	36
Tabela 6 - Frequências naturais teóricas com fluido e sem fluido dos sistemas com piezelétricos em configuração perpendicular e espessura 0,5 mm	36
Tabela 7 - Frequências naturais teóricas com fluido e sem fluido dos sistemas com piezelétricos em configuração perpendicular e espessura 1,0 mm	36
Tabela 8 - Frequências naturais teóricas com fluido e sem fluido dos sistemas com piezelétricos em configuração paralela e espessura 0,5 mm	36
Tabela 9 - Frequências naturais teóricas com fluido e sem fluido dos sistemas com piezelétricos em configuração paralela e espessura 1,0 mm	36
Tabela 10 - Frequências modais e de excitação do sistema	38
Tabela 11 – Coeficiente de potência em sistemas com piezelétricos em configuração perpendicular	39
Tabela 12 - Frequências modais e de excitação do sistema	40
Tabela 13 – Coeficiente de potência em sistemas com piezelétricos em configuração paralela	40
Tabela 14 – Custos de material para fabricação do protótipo	43
Tabela 15 - Frequências naturais teóricas e experimentais dos sistemas com piezelétricos em configuração perpendicular	51
Tabela 16 - Frequências naturais teóricas e experimentais dos sistemas com piezelétricos em configuração paralela.....	51

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Descrição do Tema	1
1.2	Objetivos gerais	1
1.3	Motivação	1
1.4	Análise dos requisitos	2
2	Estado da arte.....	3
3	Fundamentação Teórica.....	7
3.1	Materiais Piezoelétricos	7
3.2	MEF Piezelétrico	8
3.3	Força centrífuga e coeficiente de potência em uma bomba centrífuga piezelétrica tubular de fluxo.....	9
3.4	Curvas de <i>Lissajous</i>	11
4	Modelagem computacional.....	12
4.1	Metodologia da modelagem computacional	12
4.2	Definição dos parâmetros da modelagem	14
4.2.1	Geometria	14
4.2.2	Propriedades dos materiais e fluido.....	15
4.2.3	Condições de contorno	16
4.3	Modelagem computacional da estrutura em 3D	17
4.3.1	Criação dos sólidos.....	17
4.3.2	Operação Booleana.....	18
4.3.3	Resultado da Modelagem	19
4.4	Modelagem computacional por elementos finitos	20
4.4.1	Importação da geometria	20
4.4.2	Seleção das análises.....	20
4.4.3	Parametrização das propriedades dos materiais e fluido	21
4.4.4	Atribuição das propriedades dos materiais e fluido às geometrias.....	22
4.4.5	Definição das interações entre as geometrias	23
4.4.6	Discretização das geometrias (parâmetros do <i>Mesh</i>)	24
4.4.7	Nomeação de superfícies	25
4.5	Análise Modal por elementos finitos	26
4.6	Análise Harmônica por elementos finitos.....	29
4.7	Análise com fluido por elementos finitos	34
5	Resultados da modelagem computacional.....	36
5.1	Resultados da análise modal	36
5.2	Resultados da análise Harmônica	37

5.2.1	Sistemas com piezelétricos em configuração perpendicular	38
5.2.2	Sistemas com piezelétricos em configuração paralela	38
5.3	Resultado da análise com fluido	36
6	Escolha da frequência de excitação	37
6.1	Sistemas com Piezelétricos em configuração perpendicular	37
6.2	Sistemas com Piezelétricos em configuração paralela	37
7	Escolha do sistema para prototipar	38
7.1	Sistemas com Piezelétricos em configuração perpendicular	38
7.2	Sistemas com Piezelétricos em configuração paralela	39
8	Fabricação do protótipo	41
8.1	Usinagem	41
8.2	Montagem	42
8.3	Custo	43
9	Ensaio	43
9.1	Velocidade e Deslocamento	43
9.2	Fluxo	47
10	Validação da simulação e ensaios	49
10.1	Comparação entre frequências naturais teóricas e experimentais	50
10.2	Comparação entre resposta à frequência naturais teóricas e experimentais	51
10.3	Frequência de Ressonância com água	54
10.4	Fluxo	54
11	Conclusão	57
12	Referências bibliográficas	59
	Apêndice A – Desenho de conjunto	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 DESCRIÇÃO DO TEMA

O projeto consiste no estudo e desenvolvimento de um novo tipo de bomba piezelétrica que utiliza força centrífuga. Ela é composta por um tubo de metal, que é excitado por elementos piezelétrico, fixos verticalmente e dispostos perpendicularmente ou paralelamente entre si, dependendo do protótipo fabricado. Cada pastilha é excitada com sinal ondulante defasado de 90° do sinal da pastilha anterior no caso perpendicular, e sem defasagem no caso paralelo. O material piezelétrico quando excitado por uma tensão elétrica é responsável por produzir deformação de compressão e expansão no tubo de metal, que por causa da configuração de acionamento mencionado, realiza um movimento de oscilação circular na configuração perpendicular e oscilação linear na configuração paralela. Esse movimento exerce uma força centrífuga no fluido produzindo um fluxo no interior do tubo.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste trabalho consiste na modelagem computacional por elementos finitos da bomba centrífuga piezelétrica tubular de fluxo utilizando o software ANSYS de forma a obter deslocamentos, modos de vibrar, frequências de ressonância, entre outras características dessa tecnologia. A análise dos parâmetros de construção da bomba e suas influências em seu funcionamento são outros objetivos desse projeto. A conclusão do projeto se dá com a fabricação e teste qualitativo de um protótipo baseado nos resultados da simulação, além da comparação entre os dados experimentais e os obtidos na simulação.

1.3 MOTIVAÇÃO

Bombas de precisão mostram-se cada vez mais necessárias em certas áreas da biotecnologia, química e médica, por exemplo. São áreas que buscam características muito específicas para bombas: precisão na vazão, não influência química ou física no fluido de trabalho e dimensões reduzidas. A bomba piezelétrica centrífuga tubular se mostra muito promissora para atender as demandas dessas áreas, porém ainda se encontra em fase inicial de pesquisa pelo mundo com campo de estudo ainda pouco explorado para o desenvolvimento de

um produto para a indústria. Simulações computacionais mostram-se relevantes para esse tipo de bomba uma vez que permitem uma compreensão melhor dos parâmetros construtivos da mesma e um passo adiante para seu uso comercial.

1.4 ANÁLISE DOS REQUISITOS

O desenvolvimento da bomba centrífuga piezelétrica tubular de fluxo baseada em movimentos oscilatórios visa criar um modelo computacional da bomba e protótipo que sejam facilmente replicáveis. Essas características visam atender às necessidades de pesquisadores, desenvolvedores ou estudiosos que busquem aplicar o princípio da bomba à um estudo, projeto ou produto industrial. Para isso, os requisitos levados em consideração no desenvolvimento foram:

- Protótipo de baixo custo (menos de 50 reais);
- Replicabilidade da modelagem e simulação sem necessidade de conhecimento do software;
- Replicabilidade do protótipo com equipamentos disponíveis em laboratórios de fabricação (ex: FabLab).

2 ESTADO DA ARTE

Atuadores piezelétricos têm como grande vantagem a capacidade de miniaturização, evidente em aplicações como o foco nas câmeras de celulares (KO; JEONG; KOC, 2009). Em relação às bombas de fluxo piezelétricas, essa característica torna possível sua utilização na dosagem de medicamentos e reagentes químicos com precisão (JUNWU et al., 2004), no bombeamento de fluidos biológicos e na refrigeração de equipamentos eletrônicos (SINGHAL et al. 2004), por exemplo. Bombas de fluxo piezelétricas possuem diversas aplicações nas áreas química, médica e biomédica devido a sua capacidade de manipular líquidos em pequenos volumes e de maneira precisa, proporcionando também uma alta força de atuação e tempo de resposta (LASER; SANTIAGO, 2004). As características das bombas piezelétricas apontam um grande potencial tanto comercial como científico dessa tecnologia. Diversas bombas foram desenvolvidas ao longo dos anos para atender diferentes demandas de cada área, principalmente com relação ao volume de vazão, contrapressão e precisão (MA; PEI; CHEN, 2017).

As bombas piezelétricas podem ser divididas em dois grandes grupos: bombas de deslocamento e bombas dinâmicas (Figura 1). As primeiras geram a pressão no fluido através de uma ou mais fronteiras móveis, enquanto as segundas acrescentam energia ao fluido de trabalho continuamente por adição de momento ou pressão diretamente (LASER; SANTIAGO, 2004). Apresentada por Van Lintel et al. (VAN LINTEL et al., 1988), o principal tipo de bomba de fluxo piezelétrica utiliza o princípio de diafragma para bombear o fluido e válvulas para controlar o sentido do fluxo. Apesar de serem o tipo mais comum, elas apresentam alguns problemas como a dificuldade de miniaturização, elevadas quedas de pressão, fadiga das válvulas e frequências de operação relativamente baixas para os elementos piezelétricos.

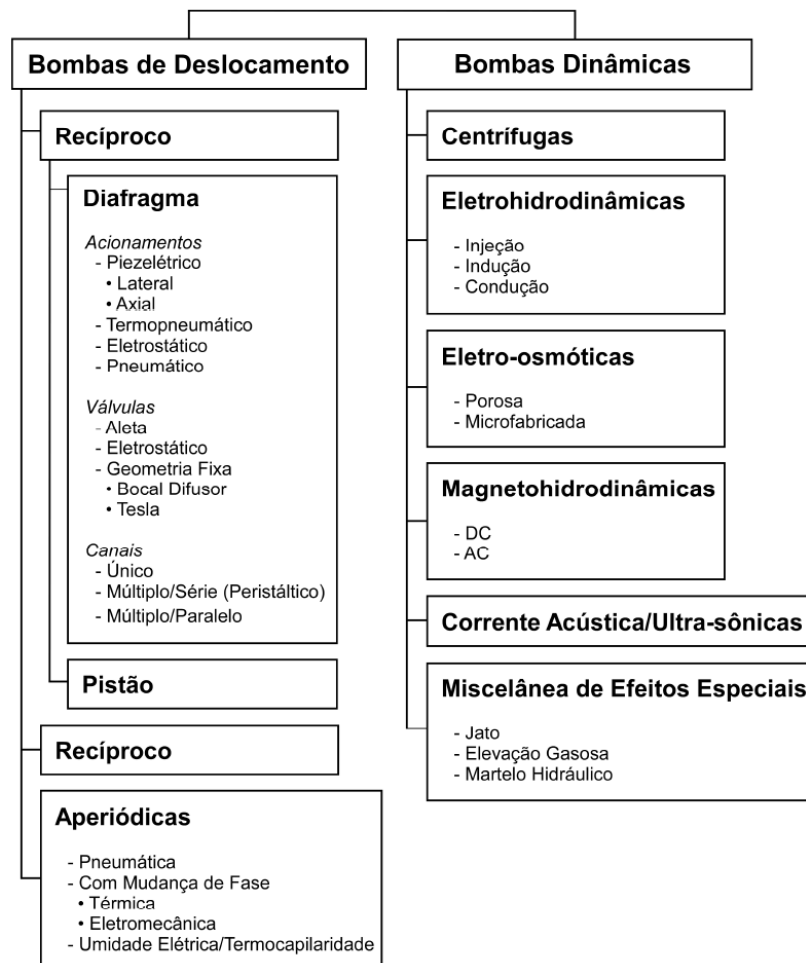


Figura 1 -Classificação de bombas

Tais problemas podem ser contornados com a utilização de bombas do tipo “valve-less” (STEMEE; STEMEE, 1993), que utilizam elementos bocal/difusor ao invés das válvulas. Um extensivo trabalho sobre esse tipo de bomba de fluxo foi realizado por Andres Choi (CHOI, 2009), que faz uso de simulações computacionais para determinar os parâmetros geométricos otimizados para esse tipo de bomba. A construção do protótipo mostrou que elas podem ser uma opção para as bombas com válvulas.

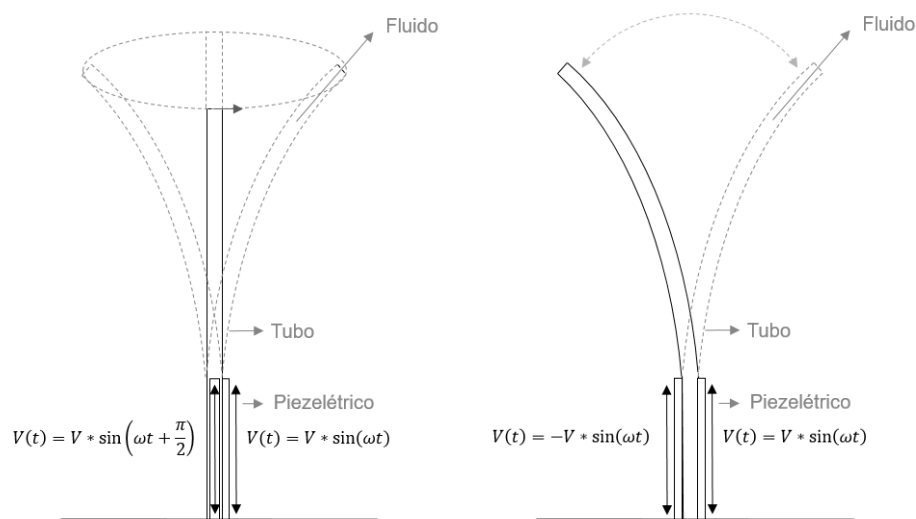


Figura 2 - Princípio de funcionamento da bomba de fluxo com configuração do piezelétrico em perpendicular e em paralelo, respectivamente

A bomba de fluxo proposta por Yu Ting Ma et al. (MA et al., 2010) utiliza a força centrífuga para bombear o fluido, com a vantagem de possuir uma construção simples e poder trabalhar com altas frequências. A força centrífuga é obtida através de um tubo de metal excitado por quatro cerâmicas piezelétricas na sua base, que vibram de maneira que a ponta do tubo faça um movimento rotativo ou linear e a base fique fixa, como representado na Figura 2. O fluido no tubo fica submetido a essa força centrífuga criando um fluxo unidirecional de sentido axial, construção ilustrada na Figura 3.



Figura 3 - Estrutura da bomba centrífuga utilizando movimento oscilatório de um tubo de metal

Em uma publicação de 2017, Yu Ting Ma et al. deram continuidade no desenvolvimento da bomba de movimento oscilatório (MA et al., 2017). Nesse novo artigo, foi realizada a análise elétrica, mecânica e do fluido do sistema que compõem a bomba. Segundo o autor, o objetivo dessa publicação foi desenvolver um modelo matemático compreensivo da bomba piezelétrica de força centrífuga.

O presente trabalho tratará do desenvolvimento de uma bomba piezelétrica centrífuga de baixo custo baseado no movimento oscilatório de um tubo de metal, através da realização da modelagem de elementos finitos e da posterior construção e caracterização do protótipo. Ao longo da monografia serão apresentadas as metodologias empregadas, princípio de funcionamento e os resultados obtidos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

Materiais piezelétricos se caracterizam por apresentarem uma deformação mecânica proporcional a uma tensão elétrica. O mesmo é verdade no sentido inverso, apresentando uma tensão elétrica quando sofre uma deformação mecânica. Os efeitos descritos estão ilustrados na Figura 4 e Figura 5, respectivamente.

Por conta desse comportamento, esse material é muito utilizado quando se busca medir ou impor pequenos deslocamentos mecânicos. Ele é muito utilizado, por exemplo, em acelerômetros, microfones, nanoposicionadores, bombas de precisão entre outras.

O efeito dos materiais piezelétricos foi descoberto em 1880 pelos irmãos Pierre e Jacques Curie que identificaram a piezeletricidade em cristais de quartzo. Em 1948 ocorreram grandes avanços na área com extração dos coeficientes piezelétricos do material titanato de bário (BaTiO_3) mais conhecido por PZT. Esse mesmo material, alguns anos mais tarde, torna-se comercialmente disponível e possibilita a expansão do uso da piezeletricidade (VAZQUEZ CARAZO, 2016).

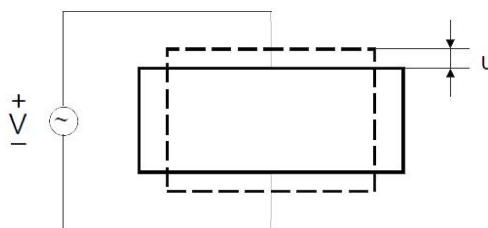


Figura 4 - Deformação do material piezelétrico devido a uma tensão elétrica

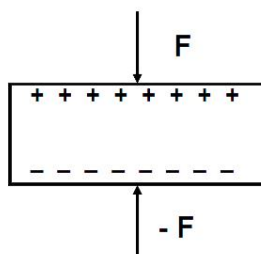


Figura 5 - Surgimento de uma tensão elétrica devido a deformação do material piezelétrico

As equações que são utilizadas para modelar o material piezelétricos são (IKEDA, 1996):

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{E} + \mathbf{e} \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^t \mathbf{E} \quad (2)$$

Sendo:

\mathbf{T} – Tensor de tensão mecânica

\mathbf{D} – Vetor de deslocamento elétrico

\mathbf{c}^E – Tensor de rigidez elástica para campo elétrico constante

\mathbf{S} – Tensor de deformação mecânica

\mathbf{e} – Tensor de coeficientes piezelétricos de tensão mecânica

$\boldsymbol{\varepsilon}^S$ – Tensor dielétrico para deformação constante

\mathbf{E} – Vetor campo elétrico

As matrizes referentes aos tensores são compostas pelos elementos:

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$S_{jk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (7)$$

Sendo ϕ o potencial elétrico aplicado no material piezelétrico.

3.2 MEF PIEZELÉTRICO

Para simulações da bomba piezelétrica e estudo dos parâmetros elétricos e mecânicos da mesma, é utilizado o software *ANSYS* que realiza a análise através do método dos elementos finitos. As equações de equilíbrio podem ser descritas em função do:

\mathbf{U} – Deslocamento Nodal

\emptyset – Potencial Elétrico Nodal
 F – Carregamentos mecânicos
 Q – Carregamentos elétricos

A equação então pode ser escrita como a seguinte:

$$[K_{u\emptyset}]^T \{U\} + [K_{\emptyset\emptyset}] \{\emptyset\} = \{Q\} \quad (8)$$

$$[M_{uu}] \{\ddot{U}\} + [C_{uu}] \{\dot{U}\} + [K_{uu}] \{U\} + [K_{u\emptyset}] \{\emptyset\} = \{F\} \quad (9)$$

As equações expressas na forma matricial são:

$$\begin{bmatrix} [M_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{U}\} \\ \{\ddot{\emptyset}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{U}\} \\ \{\dot{\emptyset}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{u\emptyset}] \\ [K_{u\emptyset}] & [K_{\emptyset\emptyset}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U\} \\ \{\emptyset\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Sendo:

$[K_{uu}]$ – Matriz de rigidez mecânica
 $[K_{u\emptyset}]$ – Matriz de acoplamento piezelétrico
 $[K_{\emptyset\emptyset}]$ – Matriz de rigidez dielétrica
 $[M_{uu}]$ – Matriz de massa
 $[C_{uu}]$ – Matriz de amortecimento mecânico

3.3 FORÇA CENTRÍFUGA E COEFICIENTE DE POTÊNCIA EM UMA BOMBA CENTRÍFUGA PIEZELÉTRICA TUBULAR DE FLUXO^[EB1]

Baseado no teoria apresentada em “Miniature tubular centrifugal piezoelectric pump utilizing wobbling motion.” (MA et al., 2017), a força centrífuga pode ser expressa pela equação 11 e representada na Figura 6

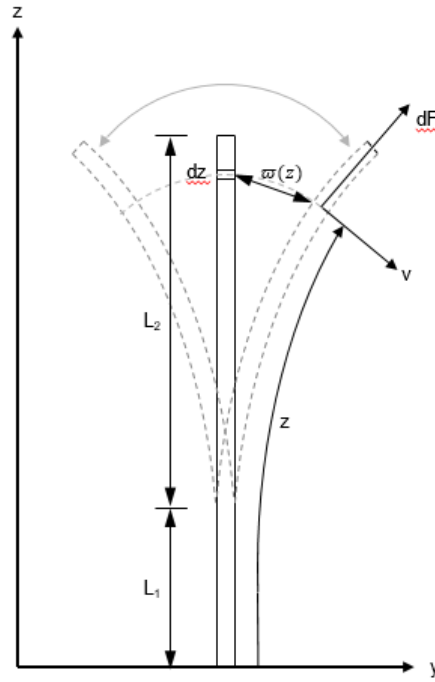


Figura 6 – Força centrífuga da bomba

$$F = \int_0^{L_1} \frac{\rho_l \pi R_i^2}{z} \varpi_1^2(z) \omega^2 \cos^2(\omega t) dz + \int_{L_1}^{L_1+L_2} \frac{\rho_l \pi R_i^2}{z} \varpi_2^2(z) \omega^2 \cos^2(\omega t) dz \quad (11)$$

Sendo:

$$\omega = 2\pi f \quad (12)$$

$$A_n = \int_a^b \varpi_n^2(z) dz \quad (13)$$

Onde:

F é a força centrífuga em N

ρ_l é a densidade do fluido em $kg.m$

R_i é o raio interno do tubo em m

L_1 é o comprimento do tubo com piezelétrico em m

L_2 é o comprimento do tubo sem piezelétrico em m

ω é a frequência angular em Hz

f é a frequência linear em Hz

ϖ é a amplitude do deslocamento que varia com Z em m

A é a amplitude total do deslocamento em m

Define-se coeficiente de potencial (Ψ) o produto entre a amplitude total do deslocamento e a frequência linear. Juntando a equação 11,12 e 13, tem-se a proporcionalidade abaixo.

$$F \propto \Psi^2 \quad (14)$$

A força centrífuga é, portanto, proporcional ao quadrado do coeficiente de potência. Esta grandeza foi utilizada como parâmetro de comparação entre os sistemas analisados.

3.4 CURVAS DE *LISSAJOUS*

Na matemática, a curva de *Lissajous* é o gráfico produzido por um sistema de equações paramétricas, tais que,

$$x = A.Sen(at + \delta) \quad (15)$$

$$y = B.Sen(bt) \quad (16)$$

No sistema estudado, temos que:

$$\delta = \pi \quad (17)$$

$$a = b \quad (18)$$

$A =$ Deslocamento máximo da ponta do tubo em X

$B =$ Deslocamento máximo da ponta do tubo em Z

Logo,

$$x = A.Sen(at + \pi) \quad (19)$$

$$y = B.Sen(at) \quad (20)$$

4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

4.1 METODOLOGIA DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Analises através de modelagem por elementos finitos são comumente utilizadas na resolução e diagnóstico de problemas de análise estrutural, térmica, acústica, dinâmica, eletromagnética, fluídos, etc. Através dessas análises é possível representar diversos cenários e avalia-los sem a necessidade de montar um protótipo para cada um. No presente trabalho, a análise por elementos finitos visa representar diferentes sistemas, compará-los entre si e escolher os melhores para serem prototipados. Além disso, visa prever alguns comportamentos como frequência de ressonância, deslocamento do tubo, coeficiente de potência e força centrífuga.

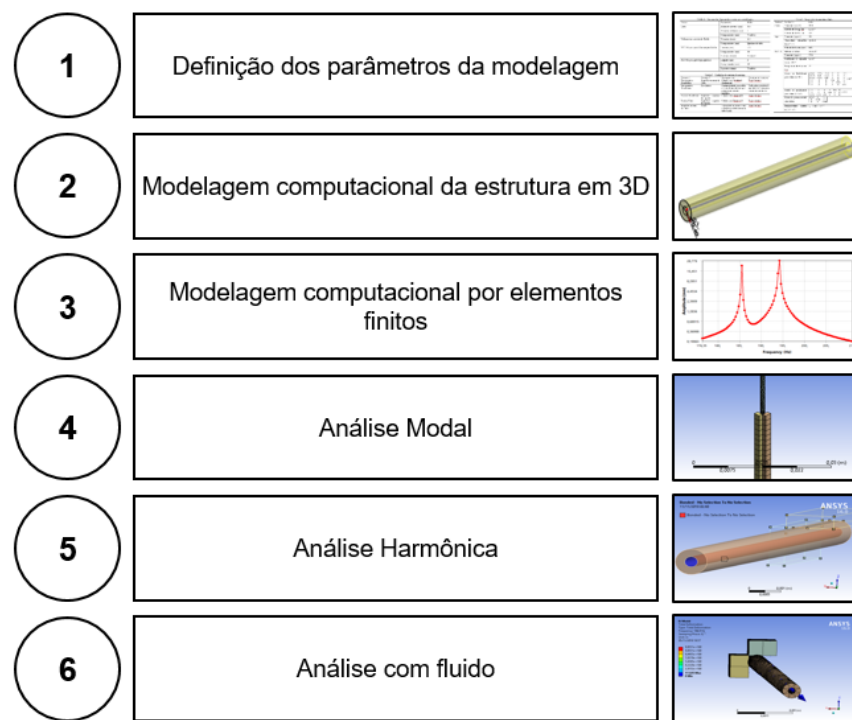


Figura 7 – Etapas da modelagem computacional

Para simular o comportamento da bomba, é necessário dividir o problema em seis etapas como indicado na Figura 7. As primeiras etapas consistem na definição dos parâmetros da modelagem e na modelagem da estrutura em 3D. Para essas etapas foi adotado um modelo de bomba simplificado que contém apenas as peças que causam impactos significativos na simulação. A modelagem descrita neste item consiste basicamente no modelo simplificado da

bomba pois somente as peças essenciais para o estudo por elementos finitos foram modeladas, estudo que será explicado no capítulo subsequente.

Para se encontrar a faixa de operações da bomba piezelétrica, foi necessário fazer a modelagem computacional por elementos finitos e, em seguida, foram realizadas a análise modal da bomba sem o fluido e a análise harmônica sem o fluido. A primeira análise forneceu a frequência e o modo de vibrar enquanto que a segunda forneceu os deslocamentos reais e complexos; com os quais foi possível obter as curvas de *Lissajous*.

A partir das análises anteriores foi possível escolher dois modelos com as melhores características para bombeamento do fluxo de água. Porém com o fluido no interior do tubo os resultados das análises anteriores sofreriam mudanças, assim foi realizado a simulação do acoplamento do fluido à análise modal, para estudar seu comportamento e ser possível compará-lo com os resultados experimentais.

A modelagem em 3D utilizou o software SolidWorks versão 2017, enquanto as análises utilizaram o programa Ansys versão 16, assim como “Piezo And MEMS ACT Extension” e “Acoustics Extension” compatível com programa. Nas análises, todas as unidades seguiram o sistema internacional (S.I.) e todas as posições o sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z).

As modelagens computacionais e simulação por elementos finitos foram feitas para oito configurações, que serão apresentadas na próxima sessão. Os resultados e análises, serão apresentados para todas as configurações. Entretanto, apenas uma das configurações será exemplificada nas etapas de modelagem da estrutura em 3D pois as outras são análogas. A configuração escolhida foi o sistema com piezelétrico de espessura 1 mm, perpendiculares entre si, e tubo com comprimento de 120 mm (Figura 8); as outras dimensões do sistema serão apresentadas na sessão subsequente.

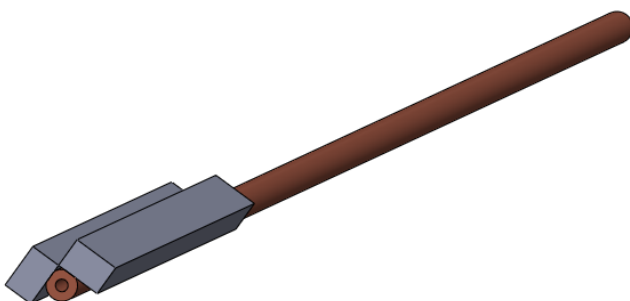


Figura 8 - Modelagem simplificada da bomba

4.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA MODELAGEM

Os parâmetros da modelagem foram divididos em três: Geometria; Propriedades dos materiais e fluido; Condições de contorno.

As geometrias e materiais usados tiveram embasamento nos textos “Multi-Field Analysis and Experimental Verification on Piezoelectric Valve-Less Pumps Actuated by Centrifugal Force” (MA; PEI; CHEN, 2017). e “Miniature tubular centrifugal piezoelectric pump utilizing wobbling motion.” (MA et al., 2017). O material do tubo e o diâmetro interno, foram diferentes dos apresentados no texto, pois foi encontrado apenas um tubo próximo às especificações.

4.2.1 Geometria

Como um dos objetivos da modelagem computacional é a análise de alguns parâmetros geométricos da construção da bomba e suas influências no seu funcionamento, escolheu-se três parâmetros para variarem (espessuras para as pastilhas piezelétricas, comprimentos de tubo¹, posicionamentos do piezelétrico). Foram analisadas duas espessuras para as pastilhas piezelétricas (0,5 mm e 1 mm), dois comprimentos de tubo (80 mm e 120 mm) e dois posicionamentos do piezelétrico (Paralelo e Perpendicular – representado na Figura 10), totalizando oito configurações a serem comparadas. A árvore de possibilidades, assim como as nomenclaturas das configurações, estão apresentadas na Figura 9. As outras dimensões foram mantidas constantes e estão descritas na Tabela 1.

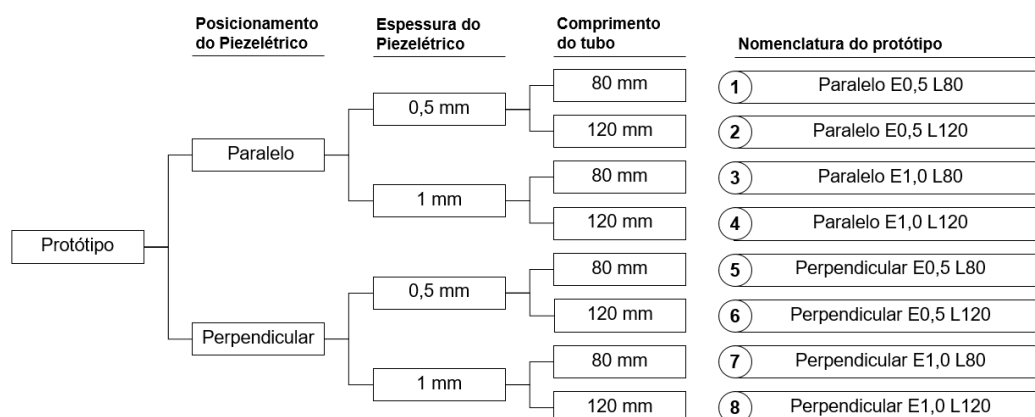


Figura 9 – Diagrama e nomenclatura dos sistemas

¹ Comprimento medido a partir da base de metal até a extremidade superior do tubo

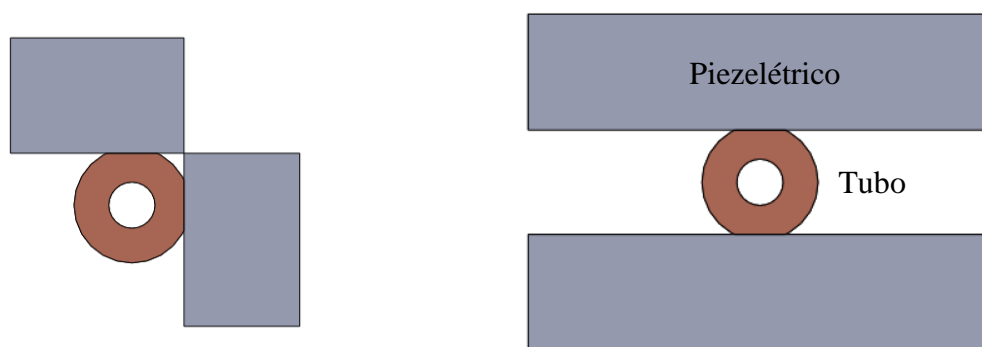


Figura 10 - Sistemas com configuração do piezoeletrico em perpendicular e em paralelo, respectivamente

Tabela 1 - Resumo das Geometrias usadas nas modelagens

<i>Corpo</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Tubo	Diâmetro interno (mm)	0,4
	Diâmetro externo (mm)	1
	Comprimento (mm)	Variável
Volume de controle do fluido	Diâmetro (mm)	0,4
	Comprimento (mm)	Igual ao do tubo
PZT-5A para protótipo perpendicular	Largura (mm)	1,5
	Comprimento (mm)	30
	Espessura (mm)	Variável
PZT-5A para protótipo paralelo	Largura (mm)	4
	Comprimento (mm)	30
	Espessura (mm)	Variável

4.2.2 Propriedades dos materiais e fluido

As propriedades e respectivos valores dos materiais e fluido utilizados na modelagem computacional estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais e fluido

<i>Material</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Cobre	Densidade (kg.m ⁻³)	8300
	Módulo de Young (Pa)	$1,1 \cdot 10^{11}$
	Coefficiente de Poisson	0,34
Água	Densidade (kg.m ⁻³)	997
	Viscosidade cinemática (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)	0,00089
	Velocidade do som (m.s ⁻¹)	1481
PZT-5A	Sistema cristalino	Uniaxial
	Densidade (kg.m ⁻³)	7750
	Coefficiente de expansão térmica (°C ⁻¹)	$1,2 \cdot 10^{-5}$
	Temperatura de referencia (°C)	22
	Matriz de flexibilidade piezelétrica (m ² .N ⁻¹)	$\begin{bmatrix} 16.4 & -5.74 & -7.22 & 0 & 0 & 0 \\ -5.74 & 16.4 & -7.22 & 0 & 0 & 0 \\ -7.22 & -7.22 & 18.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 47.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 47.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 44.3 \end{bmatrix} * 10^{-12}$
	Matriz de acoplamento piezelétrico (C. N ⁻¹)	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 584 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 584 & 0 & 0 \\ -171 & -171 & 374 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * 10^{-12}$
	Matriz de permissividade piezelétrica	$\begin{bmatrix} 1730 & 0 & 0 \\ 0 & 1730 & 0 \\ 0 & 0 & 1730 \end{bmatrix}$
	Permissividade elétrica (ε ₀) (N. m ⁻¹)	$\epsilon_0 = 8.854 * 10^{-12}$

4.2.3 Condições de contorno

Para a modelagem e simulação por elementos finitos, definiu-se as condições de contorno apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições de contorno do sistema

<i>Contato 1</i>	<i>Contato 2</i>	<i>Interação real</i>	<i>Condição de contorno</i>
Face negativa Piezelétrico	Superfície externa do Tubo	Colado com Araldite® Profissional	Engastamento
Face positiva Piezelétrico	Fio elétrico	Contato pontual com solda na face do piezelétrico que possui uma camada metálica	Toda a face positiva do piezelétrico está sujeita a uma mesma tensão
Base do Piezelétrico	Superfície superior do suporte	Colado com Durepoxi®	Engastamento
Base do Tubo	Superfície superior do suporte	Colado com Durepoxi®	Engastamento
Superfície interna do Tubo	Fluido	Velocidade no contato entre o fluido e parede interna do tubo é nula	Engastamento

4.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA EM 3D

4.3.1 Criação dos sólidos

Cilindro

Para a criação do cilindro oco foi utilizado um esboço do perfil do cilindro, Figura 11, que determina a medida do raio interno e externo, 0,4 mm e 1,0 mm respectivamente. A partir desse esboço foi realizada o recurso de extrusão com dimensão de 120 mm, representada na Figura 12.

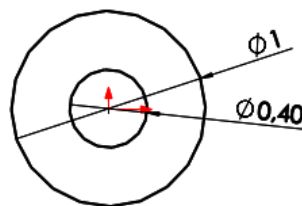


Figura 11 - Desenho base para o cilindro

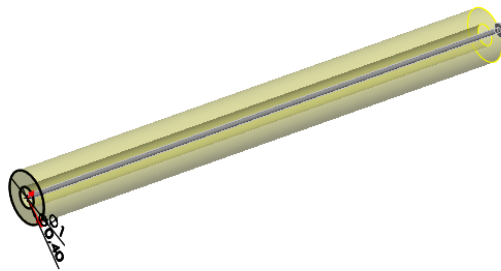


Figura 12 - Extrusão da base para a criação do sólido

Pastilhas Piezelétricas

Da mesma forma que o sólido anterior, para a criação dos atuadores piezelétricos seguiu-se as mesmas etapas. Primeiro a criação de um esboço de uma das faces que corresponde a pastilha com dimensões de 1,5 mm de largura e 30 mm de comprimento, Figura 13, com posterior uso do recurso de extrusão com dimensão de 1 mm, Figura 14.

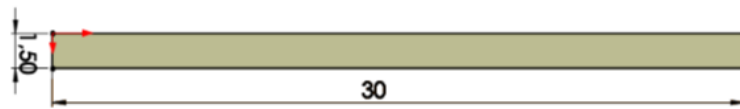


Figura 13 - Desenho base para a pastilha piezelétrica

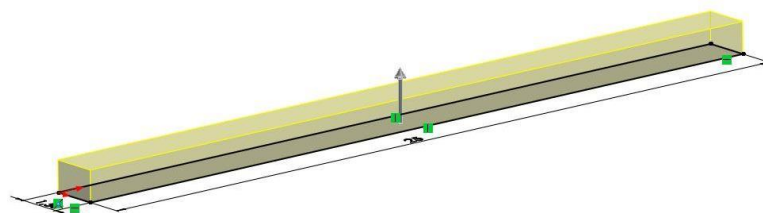


Figura 14 - Extrusão da base para criação do sólido

4.3.2 Operação Booleana

Chanfros

Para a criação dos chanfros, primeiramente deve-se dar início a uma nova montagem a qual é composta pelo cilindro e por dois atuadores piezelétrico. A Figura 15 deve ser utilizada como apoio para as etapas que serão descritas a seguir.

Os atuadores devem ser posicionados com uma de suas faces de menor área paralela ao plano de uma das extremidades do cilindro. Uma linha de apoio deve ser desenhada no plano

da extremidade do cilindro previamente utilizada tendo um sentido radial qualquer. Deve se então escolher uma aresta lateral de cada placa piezelétrica que esteja contida no plano da extremidade do cilindro. Uma das arestas escolhidas deve então ser posicionada paralela à linha de apoio e a outra aresta perpendicular a esta mesma linha. A última etapa consiste na imposição de uma distância de 0,45 mm entre a face interna do atuador piezelétrico e o centro do cilindro.

Ao final obtém-se uma configuração em que os dois sólidos (cilindro e as duas placas piezelétricas) estão se interceptando. Deve-se então editar o cilindro dentro da montagem através do recurso “Editar componente”. Isso permite a realização da operação booleana dos sólidos através do recurso de criação de cavidade que pode ser encontrado em Inserir>Recursos>Cavidade. O próximo passo consiste em selecionar as ambas pastilhas piezelétricas para que a intersecção entre elas e o cilindro seja removido. O resultado dessa operação está ilustrado na Figura 16.

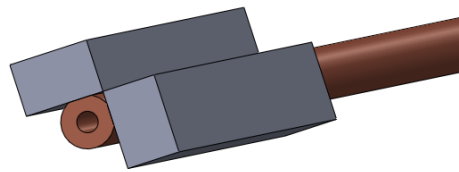


Figura 15 - Indicação das arestas e linhas usados na montagem



Figura 16 - Resultado da operação booleana entre o cilindro as pastilhas

4.3.3 Resultado da Modelagem

Depois da criação dos chanfros o modelo já se encontra totalmente definido e posicionadas dentro dos seus respectivos chanfros. A montagem já está finalizada e pronta para ser exportado para o software ANSYS. A Figura 17 representa o resultado final da etapa da modelagem da configuração escolhida.



Figura 17 - Resultado da modelagem da estrutura com piezelétricos em perpendicular da bomba no software SolidWorks

4.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS

4.4.1 Importação da geometria

Para exportar a peça criada na seção anterior para o programa Ansys, abre-se o Solidworks, clica-se Tools>Ansys 16 e então o programa de simulação será aberto em uma nova janela. No programa Ansys, as características da bomba modelada devem ter sido inseridas no campo Geometry automaticamente, como indicado na Figura 18.

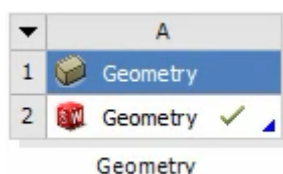


Figura 18 - *Project Schematic Geometry*

4.4.2 Seleção das análises

Para escolher o tipo de simulação a ser feita, deve-se clicar na aba “Analysis systems”, escolher as opções Modal, Harmonic Reponse, Fluid Flow, System coupling e adicionar as relações entre as análises, como indicado na Figura 19.

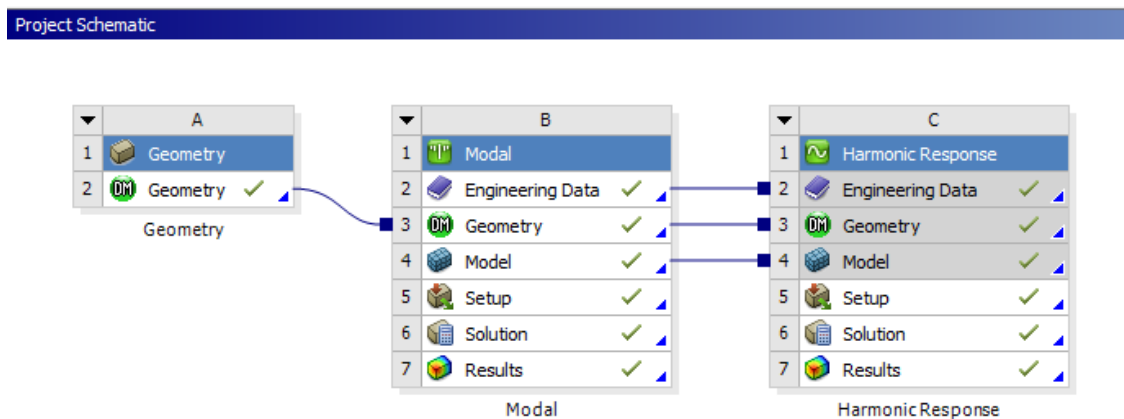


Figura 19 - *Project Schematic*

4.4.3 Parametrização das propriedades dos materiais e fluido

Abre-se o módulo “Engineering Data” para a criação de um novo material: “Piezo”. O piezelétrico usado nessa simulação foi o Lead Zirconate Titanate (PZT-5A), cujas propriedades são apresentados na Tabela 2.

Adicionando os dados ao software, tem-se:

Properties of Outline Row 4: Piezo					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7750	kg m ⁻³		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C ⁻¹		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Anisotropic Elasticity	Tabular			

Figura 20 - Propriedades do material “Piezo”

Table of Properties Row 6: Anisotropic Elasticity						
	A	B	C	D	E	F
1	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)
2	1,11E+11					
3	7,52E+10	1,2E+11				
4	7,52E+10	7,54E+10	1,2E+11			
5	0	0	0	2,305E+10		
6	0	0	0	0	2,23E+10	
7	0	0	0	0	0	2,305E+10

Figura 21 - Matriz de elasticidade anisotrópica do material “Piezo”

Para as características do material do tubo, utilizou-se o aço “Cooper” já incluso no Ansys, cujas características estão indicadas na Figura 22

Properties of Outline Row 5: Copper Alloy				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	8300	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
4	Coefficient of Thermal Expansion	1,8E-05	C ⁻¹	
5	Reference Temperature	22	C	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Mod...		
8	Young's Modulus	1,1E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,34		
10	Bulk Modulus	1,1458E+11	Pa	
11	Shear Modulus	4,1045E+10	Pa	
12	Field Variables			

Figura 22- Propriedades do material "Cooper"

4.4.4 Atribuição das propriedades dos materiais e fluido às geometrias

Para dar continuidade na caracterização da simulação é necessário abrir o modelo clicando em “Model” dentro da caixa “Modal” e uma nova janela, Figura 23, será aberta.

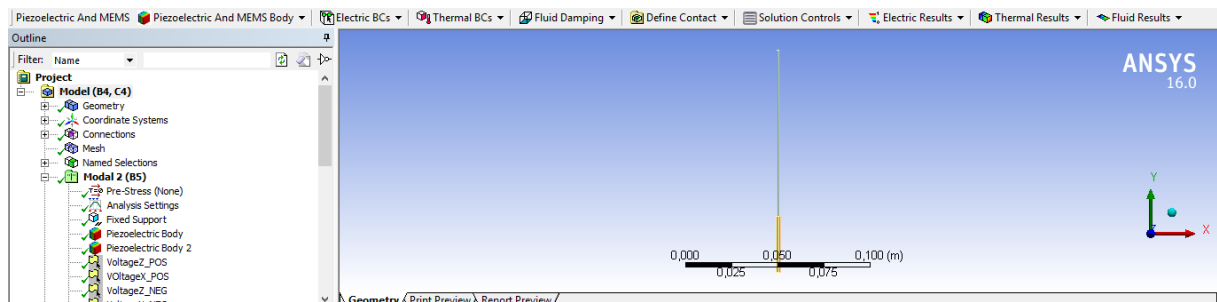


Figura 23 - Modelo da bomba

No campo “Geometry”, localizado à esquerda do software dentro da caixa outline, deve-se atribuir à cada peça, seu determinado material.

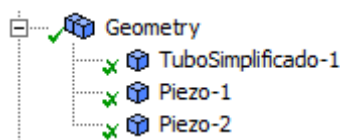


Figura 24- Sub-árvore *Geometry*

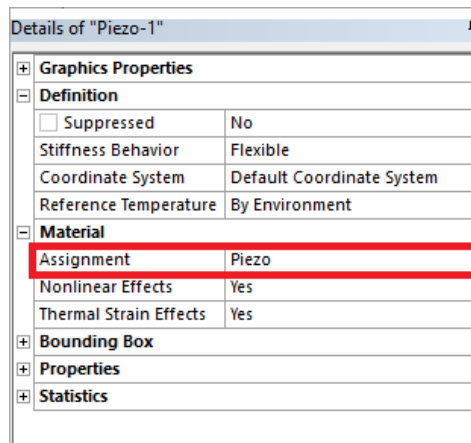


Figura 25 - Parametrização de um material à uma peça

Ao TuboSimplificado-1 atribuiu-se o material “Cooper” e ao Piezo-1 e Piezo-2, o material que anteriormente definiu-se como “Piezo”.

4.4.5 Definição das interações entre as geometrias

A próxima etapa é definir a interação entre as peças em contato (Figura 26). No caso da bomba, a única interação é o engastamento do piezelétrico ao tubo. Para parametrizar esses elementos, cria-se uma nova conexão do tipo *bonded* entre a parede do tubo (Figura 27) e uma face do piezelétrico (Figura 28).



Figura 26 - Sub-árvore *Connections*

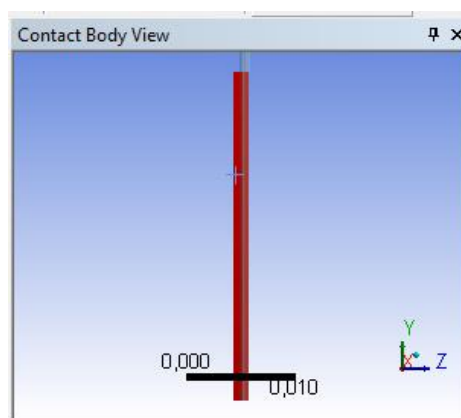


Figura 27 - Área do TuboSimplificado-1 em contato com o piezelétrico

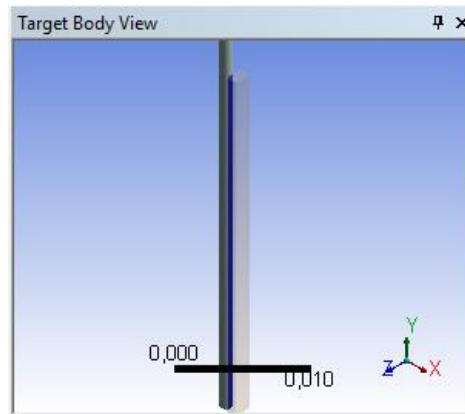


Figura 28 - Área do piezelétrico em contato com o TuboSimplificado-1

Ao final da parametrização, os elementos devem estar equivalente à Figura 29.

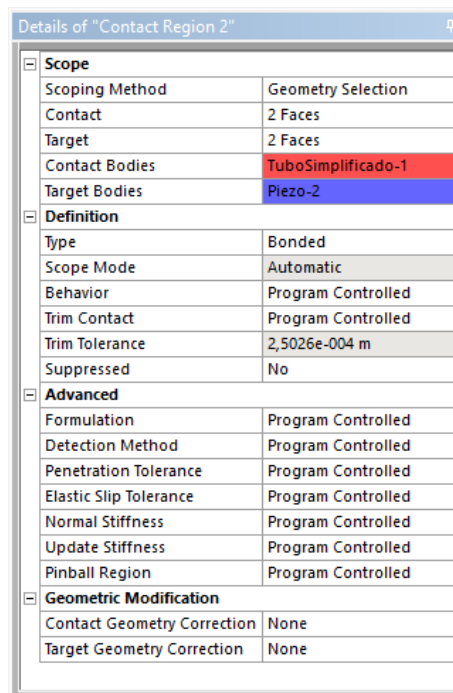


Figura 29 - Parametrização da interação entre dois contatos

NB: Dependendo do software utilizado na modelagem 3D, os contatos são importados para o Ansys. Sendo assim, é necessária apenas uma averiguação dos valores.

4.4.6 Discretização das geometrias (parâmetros do *Mesh*)

Como os componentes da bomba possuem geometrias simples (Cilindro oco e paralelepípedo) a discretização da bomba pode ser representada com os parâmetros da Figura 31 e o resultado observado na Figura 30.

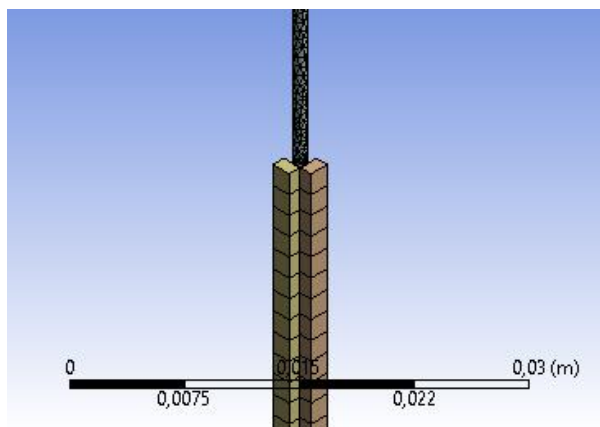


Figura 30 - Modelo da bomba discretizado

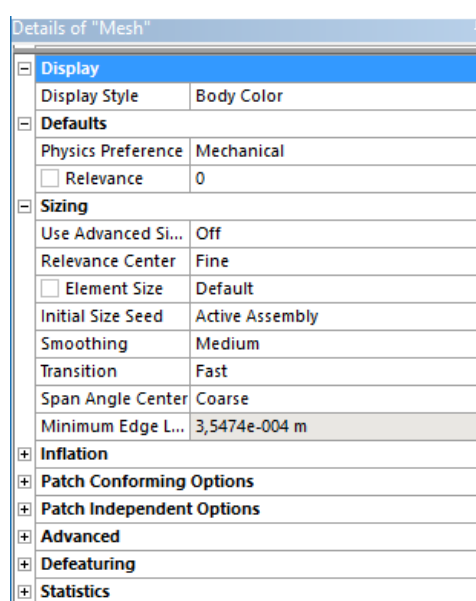


Figura 31 - Caracterização do Mesh

4.4.7 Nomeação de superfícies

Deve-se, então, nomear algumas faces do piezelétrico para indicar onde serão aplicadas as tensões oscilatórias.

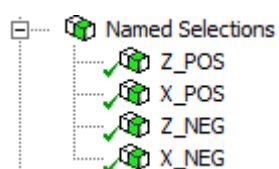


Figura 32 - Sub-árvore Named Selections

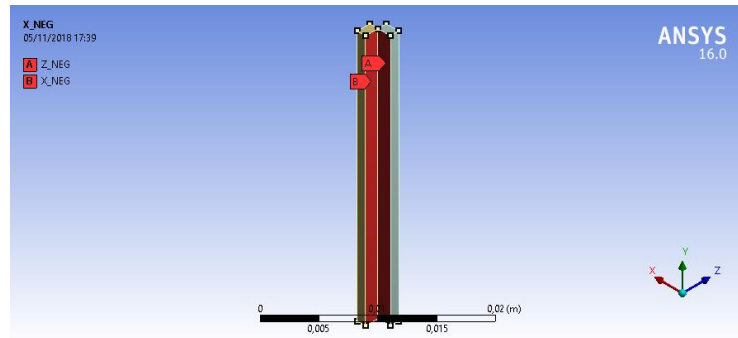


Figura 33 - Faces Z_NEG e X_NEG²

As faces em contato com o tubo são nomeadas Z_NEG (Face normal à coordenada Z) e X_NEG (Face normal à coordenada X), conforme a Figura 33.

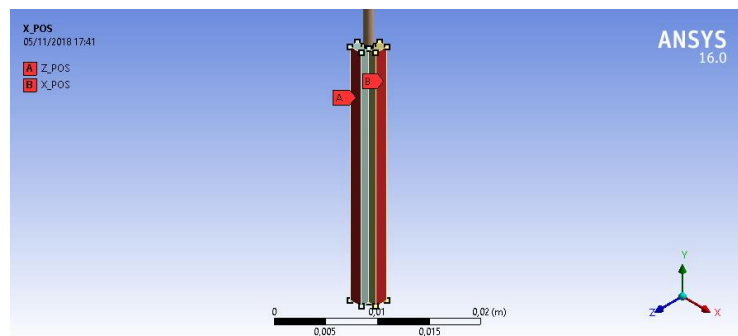


Figura 34 - Faces Z_POS e X_POS

As faces opostas à Z_NEG e X_NEG são nomeadas, respectivamente, Z_POS e X_POS, conforme Figura 34.

Terminada as etapas anteriores os dados necessários para o “Setup” estão preenchidos. As próximas etapas são as caracterizações da análise modal e harmônica.

4.5 ANÁLISE MODAL POR ELEMENTOS FINITOS

Após finalizar a modelagem do sistema na sessão anterior, serão parametrizados os campos apresentados na Figura 35 para realizar a análise modal.

² Tubo de metal central foi suprimido para melhor visualização da operação

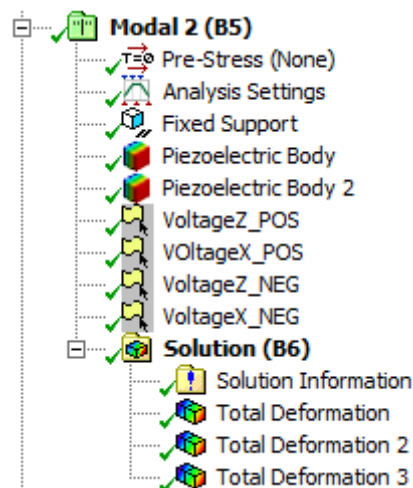


Figura 35 - Árvore da análise modal

Antes de efetuar a simulação, é necessário definir alguns parâmetros. Iniciando pelo campo “Analysis settings”, define-se o número máximo de modos de vibrar.

Details of "Analysis Settings"	
Options	
Max Modes to Find	3
Limit Search to Range	No
Solver Controls	
Damped	No
Solver Type	Program Controlled
Rotordynamics Controls	
Coriolis Effect	Off
Campbell Diagram	Off
Output Controls	
Stress	No
Strain	No
Nodal Forces	No
Calculate Reactions	No
General Miscellaneous...	No
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	C:\Users\Bruno\Desktop\Nova ...
Future Analysis	None
Scratch Solver Files ...	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Fil...	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mks

Figura 36 - Parametrização da análise modal

Em seguida parametriza-se o campo “Fixed Support”, para restringir o movimento de algumas peças. Como uma das faces do tubo e do piezelétrico estão engastadas à uma base, escolheu-se as 3 faces, mostrada na Figura 37, e inseriu-se tal informação no campo “Fixed support” (Figura 38)

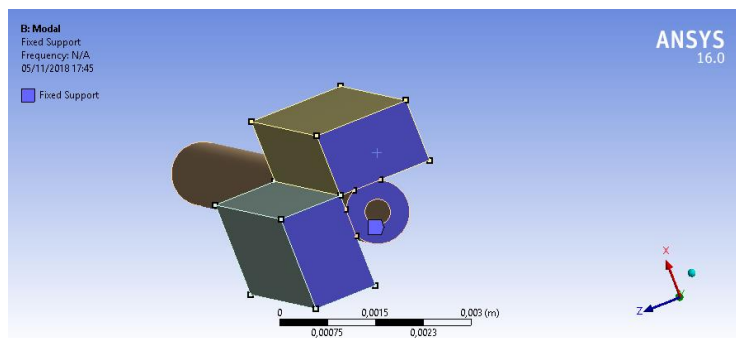


Figura 37 - Face do tubo fixa à base

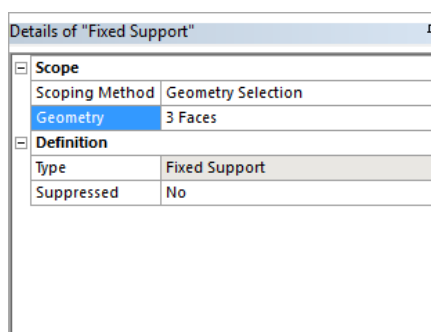


Figura 38 - Seleção da face a ser parametrizada

NB: Para a próxima etapa é necessário ter instalado e ativado a “Piezo And MEMS ACT Extension”.

O próximo passo é a definição dos componentes piezelétricos do modelo, para isso é necessário adicionar um “Piezoelectric Body” à simulação para cada pastilha piezelétrica, Figura 39, e preencher os dados com os valores das matrizes piezelétricas, como mostrado na Figura 40.

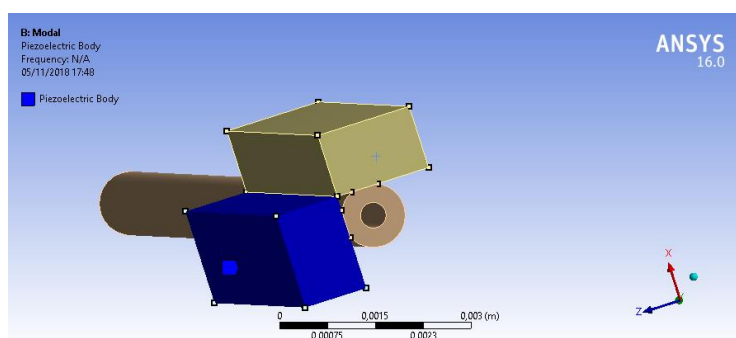


Figura 39 - Seleção do “Piezo” como um Piezoelectric Body

Deve-se prestar especial atenção a definição de “Polarization Axis” do corpo definido como piezelétrico. Esse item deve estar de acordo com o eixo paralelo ao vetor normal do plano paralelo as faces eletrificadas da pastilha piezelétrica. No caso da Figura 39 percebe-se que a coordenada Z do eixo de coordenadas global se encaixa nessas definições.

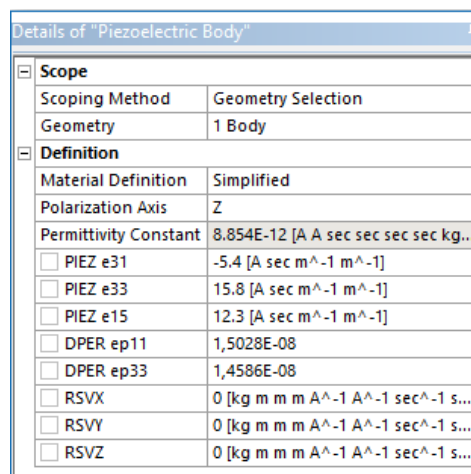


Figura 40 - Caracterização do “Piezo” como um Piezoeletric Body

Como a análise modal visa encontrar a frequência e o modo de vibrar da bomba, os piezelétricos devem estar inativos. Para isso, deve-se indicar que os piezelétricos estão submetidos à uma tensão nula, conforme Figura 41.

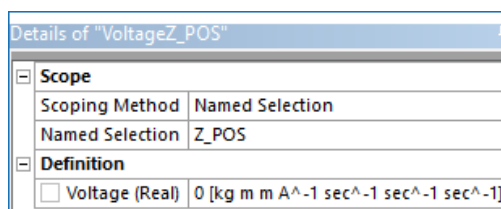


Figura 41 - Adição da tensão em uma das faces do corpo piezelétrico

Terminadas todas as parametrizações, pode-se lançar a simulação clicando em Solve. Os resultados e análise da simulação serão apresentados mais a frente.

4.6 ANÁLISE HARMÔNICA POR ELEMENTOS FINITOS

Análogo à análise Modal, a harmônica necessita de uma parametrização (Figura 42). Além dos passos descritos a seguir deve-se também realizar os passos de definição do suporte fixo e dos corpos piezelétricos. As descrições dessas tarefas podem ser encontradas no item 4.5 – Análise Modal desta monografia.

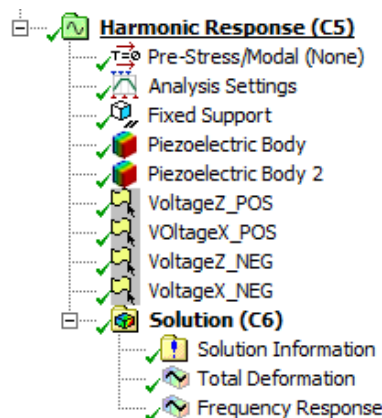


Figura 42 - Árvore dos parâmetros da análise harmônica

O primeiro passo é definir, no campo *Analysis Settings*, a faixa de frequências de excitação desejada, o coeficiente de amortecimento e valores de saída que serão necessários. Os valores são definidos no detalhamento da análise ilustrado na Figura 43.

Details of "Analysis Settings"	
Options	
Frequency Spacing	Linear
<input type="checkbox"/> Range Minimum	1, Hz
<input checked="" type="checkbox"/> Range Maximum	500, Hz
<input type="checkbox"/> Solution Intervals	10
Solution Method	Full
Variational Technology	Program Controlled
Rotordynamics Controls	
Coriolis Effect	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Calculate Reactions	Yes
General Miscellaneous	No
Damping Controls	
<input type="checkbox"/> Constant Damping Ratio	0,
Stiffness Coefficient Define By	Damping vs Frequency
Frequency	1, Hz
Damping Ratio	2,1552e-010
Stiffness Coefficient	6,8601e-011
<input type="checkbox"/> Mass Coefficient	0,
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	C:\Users\rafael\Documents\USP - 9 seme...
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mks

Figura 43 - Detalhamento da análise harmônica

Os campos *Fixed Support*, *Piezoelectric Body*, *Piezoelectric Body 2* devem ser caracterizados da mesma maneira que na análise Modal.

Diferentemente da análise anterior, como busca-se estudar a atuação dos piezelétricos, deve-se aplicar uma tensão a eles. Isso pode ser realizado através da alteração dos valores de tensão (*Voltage*) no detalhamento de cada seleção definida anteriormente, conforme Figura 44.

Tabela 4 - Tensão aplicadas nas pastilhas piezelétricas

Nome da Tensão	Named selection	Voltage (Real)	Voltage (Im)
VoltageZ_POS	Z_POS	200	0
VoltageX_POS	X_POS	0	200
VoltageZ_NEG	Z_NEG	0	0
VoltageX_NEG	X_NEG	0	0

NB: Z_POS possui voltagem real e X_POS voltagem imaginária, pois elas são defasadas de 90 graus.

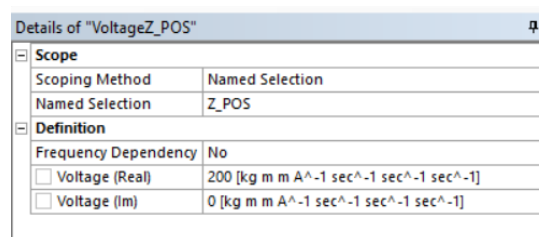


Figura 44 - Detalhamento de uma das seleções para aplicação da tensão

Para extrair o gráfico de resposta a frequência, clica-se com o botão direito em Solution> Insert> Frequency Response> Deformation, como indicado na Figura 45.

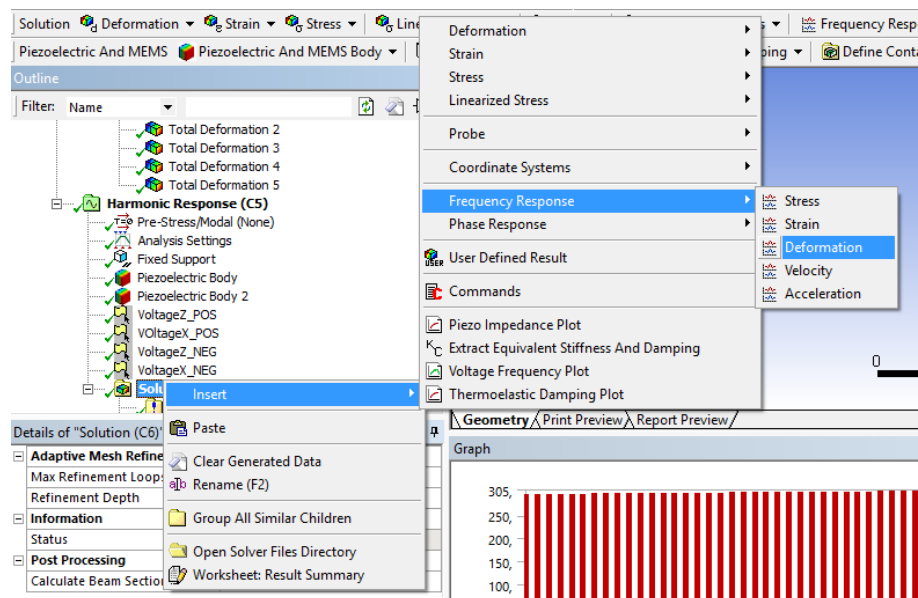


Figura 45 - Seleção de solução

Em seguida deve-se selecionar a *Geometry* como indicado na Figura 46 e Figura 47 e garantir que o intervalo de frequência à ser estudado é o adequado.

Details of "Frequency Response"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Spatial Resolution	Use Average
[-] Definition	
Type	Directional Velocity
Orientation	X Axis
Suppressed	No
[-] Options	
Frequency Range	Use Parent
Minimum Frequency	0, Hz
Maximum Frequency	500, Hz
Display	Bode
Chart Viewing Style	Log Y
[+] Results	

Figura 46 - Seleção da geometria

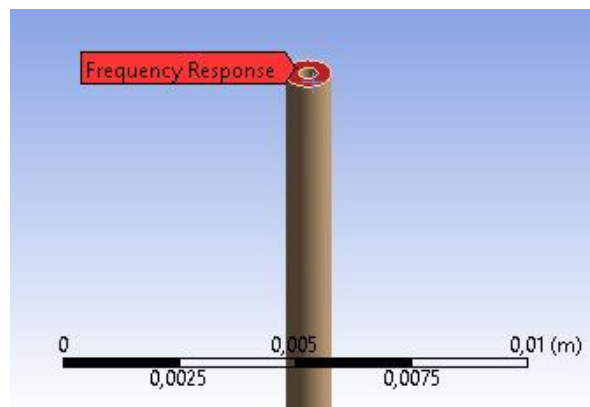


Figura 47 - Seleção da geometria no modelo

Para extrair o deslocamento da ponta do tubo em X e Z como resposta de fase, é necessário criar um novo pedido de solução clicando com o botão direito em Solution> Insert> Phase Response> Deformation (Figura 48).

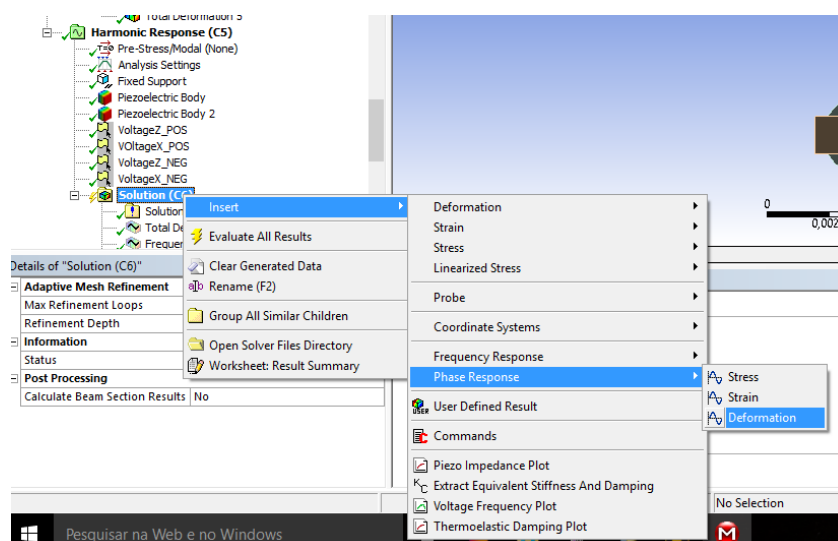


Figura 48 - Seleção da solução complementar

Em seguida, é necessário selecionar a geometria a ser analisada (Figura 49 e Figura 50), a frequência de excitação e a direção orientação da deformação (X e Z).

Details of "Phase Response"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Spatial Resolution	Use Average
[-] Definition	
Type	Directional Deformation
Orientation	X Axis
Suppressed	No
[-] Options	
Frequency	61,7 Hz
Duration	720. °

Figura 49 - Seleção da geometria

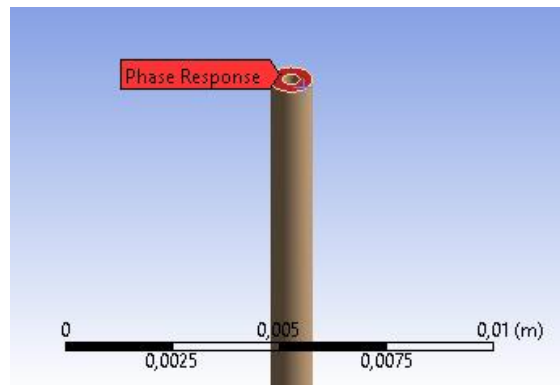


Figura 50 - Seleção da geometria no modelo

Criando uma resposta de fase para cada sistema e para as duas orientações de deformação, tem-se a árvore apresentada na Figura 51.

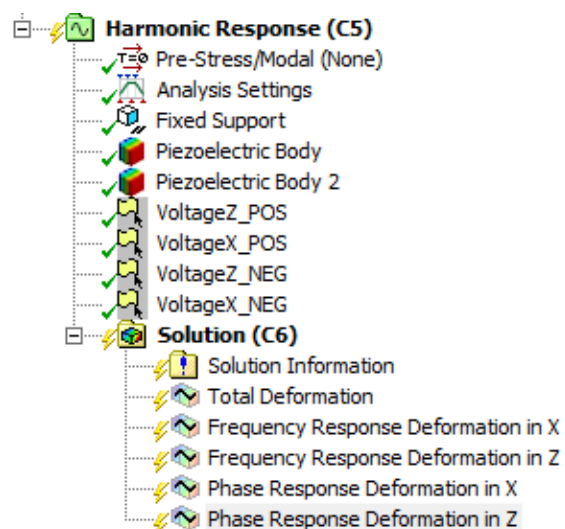


Figura 51 - Árvore dos parâmetros da análise harmônica com estudos complementares

Os dados retirados da resposta de fase representam o deslocamento da ponta do tubo em X e Z e permitem desenhar as curvas de *jous* dos sistemas.

Terminadas todas as parametrizações, pode-se lançar a simulação clicando em Solve. Os resultados e análise da simulação serão apresentados mais à frente.

4.7 ANÁLISE COM FLUIDO POR ELEMENTOS FINITOS

Tendo como base as simulações anteriores, adicionou-se um corpo, posteriormente identificado como água e utilizando a extensão “Acoustics”, simulou-se os mesmos parâmetros descritos nas sessões anteriores. Tal modelagem não visa identificar o fluxo de água no tubo e sim a influência da água na frequência de ressonância e respostas às frequências.

Partindo da simulação descrita nas sessões anteriores, deve-se inserir um cilindro no tubo com diâmetro igual ao diâmetro interno do tubo e de comprimento igual ao tubo. O resultado da adição do material está apresentado na Figura 53. Designa-se à essa geometria, qualquer material, pois ele será sobreposto pela extensão Acoustics.

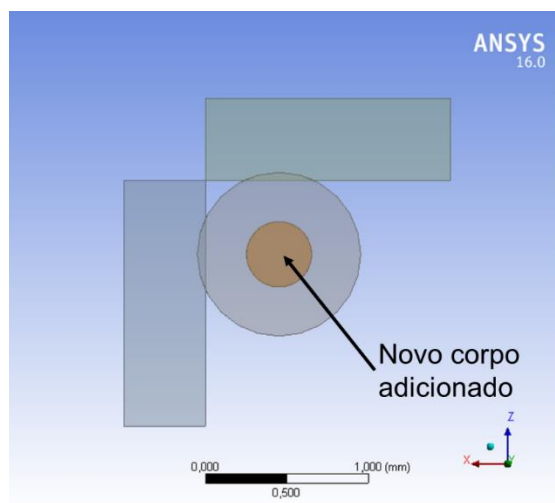


Figura 52 - Novo corpo adicionado a simulação

Após criação da geometria, indica-se as interações desta com o sistema. Insere-se então um contato entre a face lateral da geometria “Água” com o interior do “TuboSimplificado-1 ” (Figura 53).

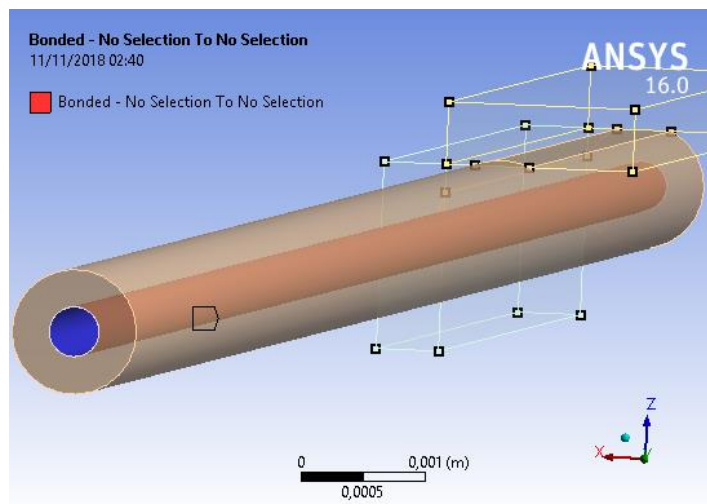


Figura 53 - Contato entre o tubo de metal e a água

Em seguida, para a análise modal e harmônica, deve-se criar um “Acoustic body”, como indicado na Figura 54 e designar as características do fluido, como indicado na Figura 55.

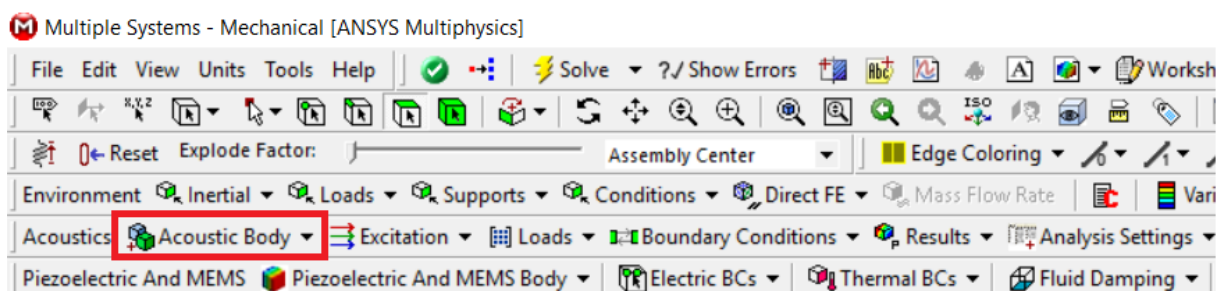


Figura 54 - Designação no corpo como elemento acústico

Details of "Acoustic Body"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Frequency Dependency	No
<input type="checkbox"/> Mass Density	997 [kg m ⁻³]
<input type="checkbox"/> Sound Speed	1481 [m sec ⁻¹]
<input type="checkbox"/> Dynamic Viscosity	0.00089 [Pa sec]
<input type="checkbox"/> Bulk Viscosity	0 [Pa sec]
<input type="checkbox"/> Thermal Conductivity	0 [W m ⁻¹ C ⁻¹]
<input type="checkbox"/> Specific Heat Cp	0 [J kg ⁻¹ C ⁻¹]
<input type="checkbox"/> Specific Heat Cv	0 [J kg ⁻¹ C ⁻¹]
<input type="checkbox"/> Reference Pressure	2E-05 [Pa]
<input type="checkbox"/> Reference Static Pressure	101325 [Pa]
Acoustic-Structural Coupled Body Options	Program Controlled Coupled

Figura 55 - Determinação das características do fluido

Terminadas todas as parametrizações, pode-se lançar a simulação clicando em Solve. Os resultados e análise da simulação serão apresentados mais à frente.

5 RESULTADOS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

5.1 RESULTADOS DA ANÁLISE MODAL

Os resultados para essa análise podem ser encontrados na Tabela 5. Essa etapa tinha como objetivo encontrar as frequências naturais de vibração do sistema. A partir dessas frequências é possível escolher uma frequência de excitação das pastilhas piezelétricas que proporcione um movimento oscilatório na ponta do tubo da bomba.

Tabela 5 - Frequências naturais dos sistemas

Posicionamento do piezo	<i>Paralelos</i>				<i>Perpendiculares</i>			
Espessura (mm)	0,5		1		0,5		1	
Comprimento (mm)	80	120	80	120	80	120	80	120
1º Modo (Hz)	193,38	65,0	210,1	66,5	174,0	60,9	185,4	59,4
2º Modo (Hz)	195,65	66,0	211,0	66,7	176,3	62,9	194,1	64,1
3º Modo (Hz)	733,86	387,2	1177,0	412,0	723,7	350,9	751,4	327,5
4º Modo (Hz)	748,88	405,3	1222,8	412,2	748,9	362,0	783,3	385,9

Em todos os sistemas o 1º e 2º modo de vibrar correspondem a deslocamentos em direções perpendiculares entre si. Isso pode ser visualizado na Figura 56 e Figura 57 de umas das simulações realizadas para a configuração perpendicular e na Figura 58 e Figura 59 para a configuração em paralelo. Isso será explorado mais adiante no estudo e será o fator de escolha da frequência de excitação das pastilhas piezelétricas.

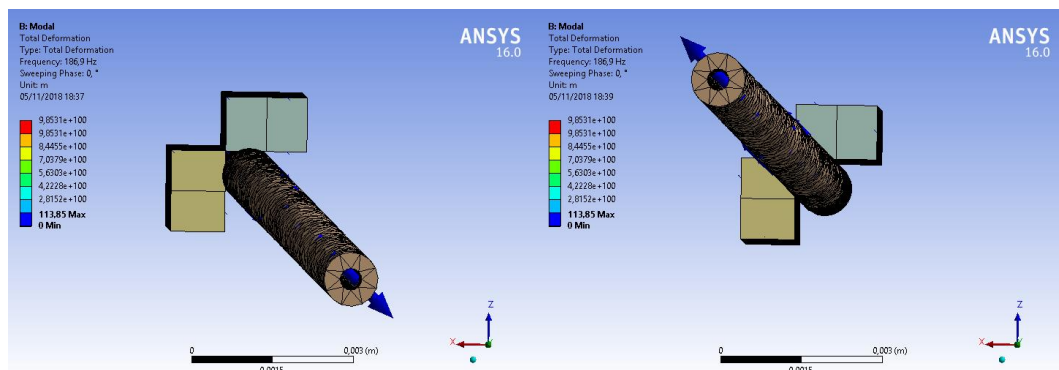


Figura 56 - Primeiro modo de vibrar do sistema com piezelétricos em configuração perpendicular

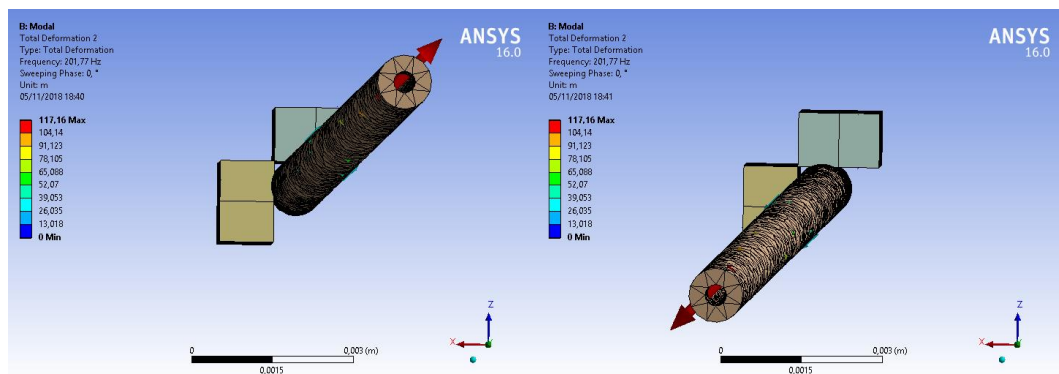


Figura 57 - Segundo modo de vibrar do sistema com piezelétricos em configuração perpendicular

Para todos os demais modelos de pastilhas piezelétricas posicionadas perpendiculares e paralelamente a configuração entre o primeiro e o segundo modo de vibrar se manteve com alterações apenas no valor da frequência de ressonância.

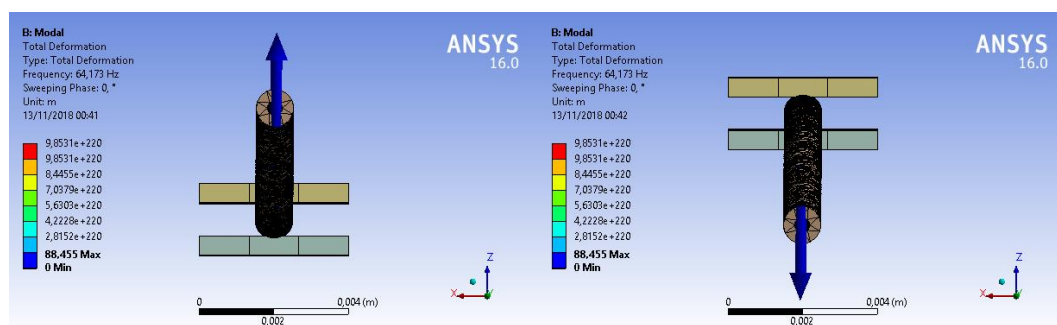


Figura 58 - Primeiro modo de vibrar do sistema com piezelétricos em configuração paralela

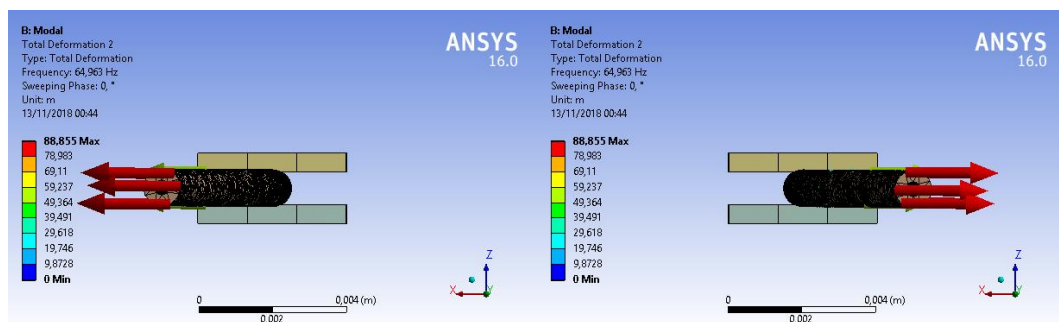


Figura 59 - Segundo modo de vibrar do sistema com piezelétricos em configuração paralela

5.2 RESULTADOS DA ANÁLISE HARMÔNICA

A análise harmônica tem como objetivo demonstrar a reação do sistema quando as pastilhas piezelétricas são excitadas em determinadas frequências. Nessa análise é possível demonstrar o deslocamento oscilatório da extremidade do tubo da bomba. Isso ocorre quando,

escolhida a frequência excitação, o sistema responde parcialmente a dois modos de vibrar distintos e perpendiculares.

5.2.1 Sistemas com piezelétricos em configuração perpendicular

Entre a Figura 60 e Figura 63 são apresentas, para os sistemas com piezelétricos em configuração perpendicular submetidos a 9 V, as relações entre a frequência de excitação do piezelétrico e amplitude do deslocamento da extremidade superior do tubo de metal em uma direção.

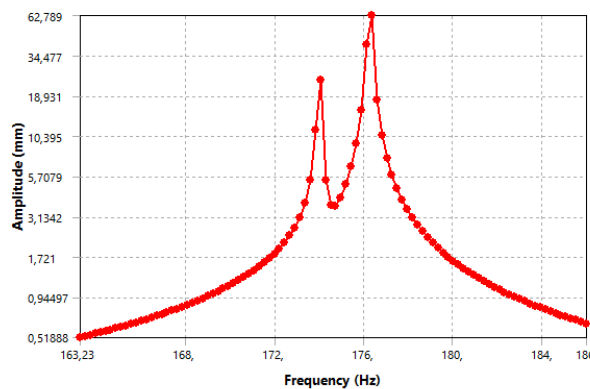


Figura 60 - Resposta à frequência do Protótipo
“Perpendicular E0,5 L80”

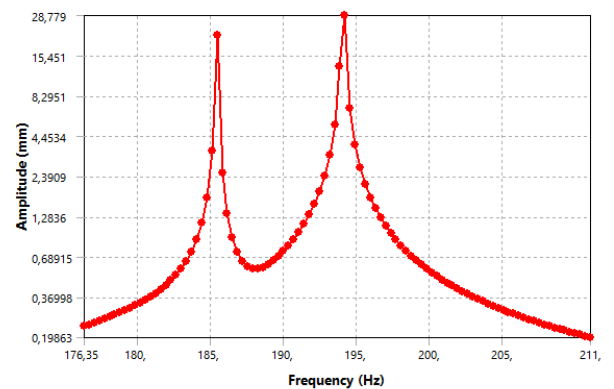


Figura 62 - Resposta à frequência do Protótipo
“Perpendicular E1,0 L80”

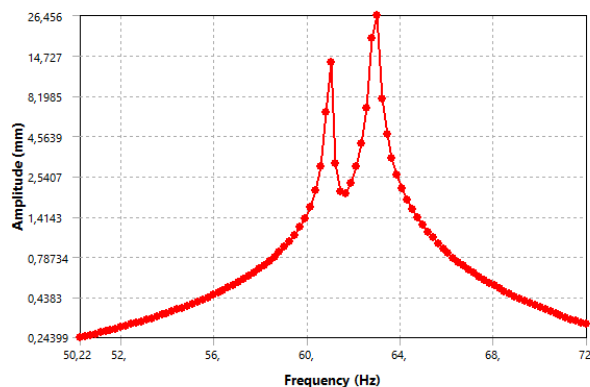


Figura 61 - Resposta à frequência do Protótipo
“Perpendicular E0,5 L120”

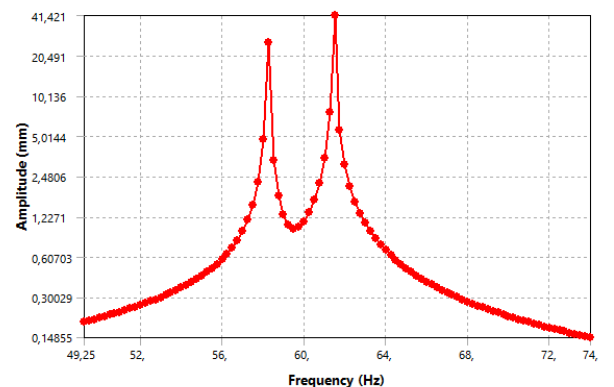


Figura 63 - Resposta à frequência do Protótipo
“Perpendicular E1,0 L120”

5.2.2 Sistemas com piezelétricos em configuração paralela

Da Figura 64 a Figura 67 são apresentas, para os sistemas com piezelétricos em configuração paralela submetidos a 9 V, as relações entre a frequência de excitação do

piezelétrico e amplitude do deslocamento da extremidade superior do tubo de metal em uma direção

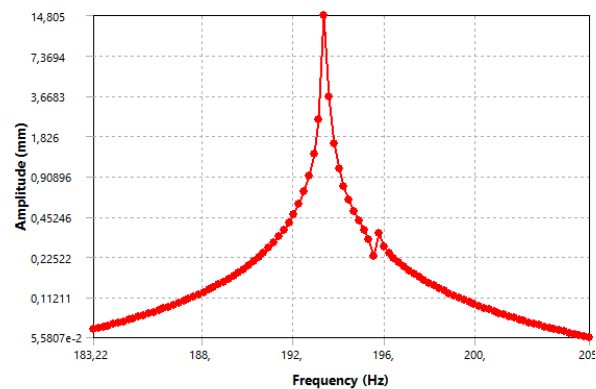


Figura 64 - Resposta à frequência do Protótipo “Paralelo E0,5 L80”

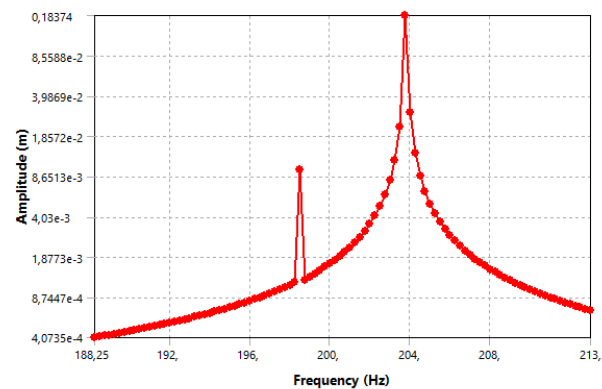


Figura 66 - Resposta à frequência do Protótipo “Paralelo E1,0 L80”

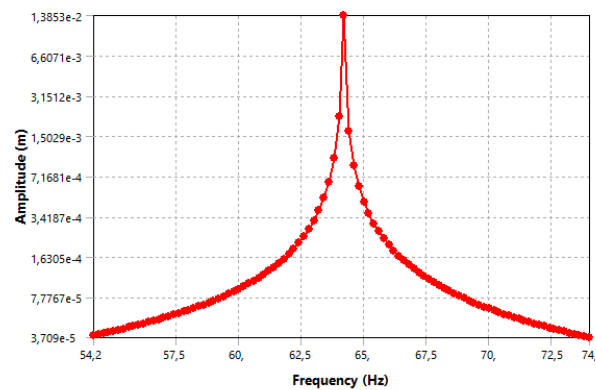


Figura 65- Resposta à frequência do Protótipo “Paralelo E0,5 L120”

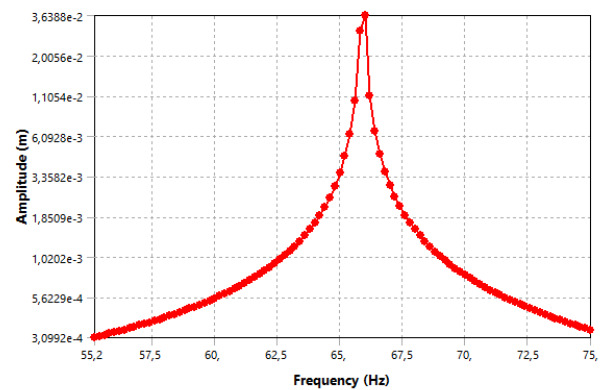


Figura 67 - Resposta à frequência do Protótipo “Paralelo E1,0 L120”

5.3 RESULTADO DA ANALISE COM FLUIDO

A análise modal e harmônica com água no interior do tubo tem como objetivo analisar a influência da água na frequência de ressonância e respostas às frequências. Nessa análise pode-se comparar as frequências de ressonância, assim como os deslocamentos oscilatório da extremidade do tubo, do sistema com e sem fluido. A Tabela 6 apresenta as frequências de ressonância de dois sistemas com fluido no tubo. Pode-se perceber que para esses sistemas, a influência da água na frequência de ressonância é praticamente desprezível.

Tabela 6 - Frequências naturais teóricas com fluído e sem fluído dos sistemas com piezelétricos em configuração perpendicular e espessura 0,5 mm

Posicionamento do piezo	<i>Perpendicular</i>
Espessura (mm)	0,5

Comprimento (mm)	80			120		
	Sem água	Com água	Diferença	Sem água	Com água	Diferença
1º Modo (Hz)	174,0	174,3	0,17%	60,9	62,3	2,2%
2º Modo (Hz)	176,3	176,6	0,17%	62,9	63,6	1,1%

Tabela 7 - Frequências naturais teóricas com fluído e sem fluído dos sistemas com piezelétricos em configuração perpendicular e espessura 1,0 mm

Posicionamento do piezo	<i>Perpendicular</i>					
Espessura (mm)	1,0					
Comprimento (mm)	80			120		
	Sem água	Com água	Diferença	Sem água	Com água	Diferença
1º Modo (Hz)	185,4	185,8	0,21%	59,4	60,8	2,3%
2º Modo (Hz)	194,1	194,5	0,20%	64,1	64,9	1,2%

Tabela 8 - Frequências naturais teóricas com fluído e sem fluído dos sistemas com piezelétricos em configuração paralela e espessura 0,5 mm

Posicionamento do piezo	<i>Paralelos</i>					
Espessura (mm)	0,5					
Comprimento (mm)	80			120		
	Sem água	Com água	Diferença	Sem água	Com água	Diferença
1º Modo (Hz)	193,4	193,8	0,20%	65,0	66,1	1,66%
2º Modo (Hz)	195,7	196,3	0,30%	66,0	66,8	1,20%

Tabela 9 - Frequências naturais teóricas com fluído e sem fluído dos sistemas com piezelétricos em configuração paralela e espessura 1,0 mm

Posicionamento do piezo	<i>Paralelos</i>					
Espessura (mm)	1,0					
Comprimento (mm)	80			120		
	Sem água	Com água	Diferença	Sem água	Com água	Diferença
1º Modo (Hz)	210,1	210,6	0,23%	66,5	67,7	1,77%
2º Modo (Hz)	211,0	211,7	0,33%	66,7	67,5	1,19%

6 ESCOLHA DA FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO^[EB2]

6.1 SISTEMAS COM PIEZELÉTRICOS EM CONFIGURAÇÃO PERPENDICULAR

Quando se excita um sistema com piezelétricos em configuração perpendicular em uma frequência natural, o sistema oscila mais próximo ao modo de vibrar natural do que ao estímulo senoidal e cossenoidal do piezelétrico. Esse fenômeno gera movimentos elípticos de distâncias focais grandes. Por outro lado, um sistema com distância focal pequena, gera uma velocidade tangencial na ponta do tubo com menor variação, ou seja, movimento na ponta do tubo próximo à um movimento circular. A frequência com maior deslocamento e movimento próximo ao circular é:

$$f = (f_{1o \text{ modo natural}} + f_{2o \text{ modo natural}}) / 2 \quad (21)$$

Sendo assim, a frequência ideal para excitação do sistema com piezelétricos em configuração perpendicular é a média entre as frequências naturais de modo 1 e 2, pois gera um deslocamento grande da ponta do tubo e com velocidade tangencial de menor variação.

Caso a diferença entre duas frequências de ressonância seja muito grande, na frequência média entre as duas haverá um valor de amplitude pequeno. Observando as Figura 60, Figura 61, Figura 62 e Figura 63, percebe-se que há uma queda de amplitude entre a amplitude na frequência natural e a da frequência média. Entretanto, a maior parte dos valores de amplitude são aceitáveis para o movimento. A escolha entre os sistemas será discutida na próxima sessão.

6.2 SISTEMAS COM PIEZELÉTRICOS EM CONFIGURAÇÃO PARALELA

O sistema com piezelétricos em paralelo possui deslocamento unicamente linear. Sendo assim, tem-se como hipótese que o maior fluxo ocorrerá na frequência que gera maior deslocamento na ponta do tubo, ou seja, uma das frequências de ressonância. Para saber qual delas possui maior deslocamento, simulou-se os dois primeiros modos de vibrar para todos os sistemas. O resultado e discussão, serão apresentados na sessão seguinte.

7 ESCOLHA DO SISTEMA PARA PROTOTIPAR^[EB3]

Conhecendo a frequência de excitação ideal para os sistemas e utilizando os resultados da análise harmônica, calculou-se os coeficientes de potências e desenhou-se as curvas de *Lissajous*, para decidir quais eram os melhores sistemas para os protótipos. Os sistemas que possuem maior coeficiente de potência e possuem também deslocamentos amplos e próximos a uma circunferência (caso piezelétrico esteja em perpendicular), foram escolhidos para serem prototipados.

Embora os valores de deslocamento sejam elevados e irrealistas, o damping utilizado em todas as análises foi o mesmo, então os valores são comparáveis. Na sessão seguinte, será calculado o damping ideal para que o resultado da simulação seja verossímil.

7.1 SISTEMAS COM PIEZELÉTRICOS EM CONFIGURAÇÃO PERPENDICULAR

Baseado na nomenclatura dos protótipos exibidos na Figura 9, os sistemas simulados foram: Perpendicular E0,5 L80; Perpendicular E0,5 L120; Perpendicular E1 L80; Perpendicular E1 L120. Fazendo uma análise modal para cada um dos sistemas, usando como frequência de excitação à citada no item anterior, tem-se como resultado a tabela abaixo:

Tabela 10 - Frequências modais e de excitação do sistema

Posicionamento Piezo	Perpendicular							
Espessura (mm)	0,5				1,0			
Comprimento (mm)	80		120		80		120	
Freq nat (Hz)	174,0	176,3	60,9	62,9	185,4	194,1	59,4	64,1
Freq. de excitação (Hz)	175,1		61,90		189,7		61,7	

Como resultado da resposta de fase da análise harmônica, para cada sistema, tem-se os deslocamentos da ponta do tubo para cada sistema. Sendo assim, é possível desenhar as curvas de *Lissajous* para cada um deles, como apresentado na Figura 68.

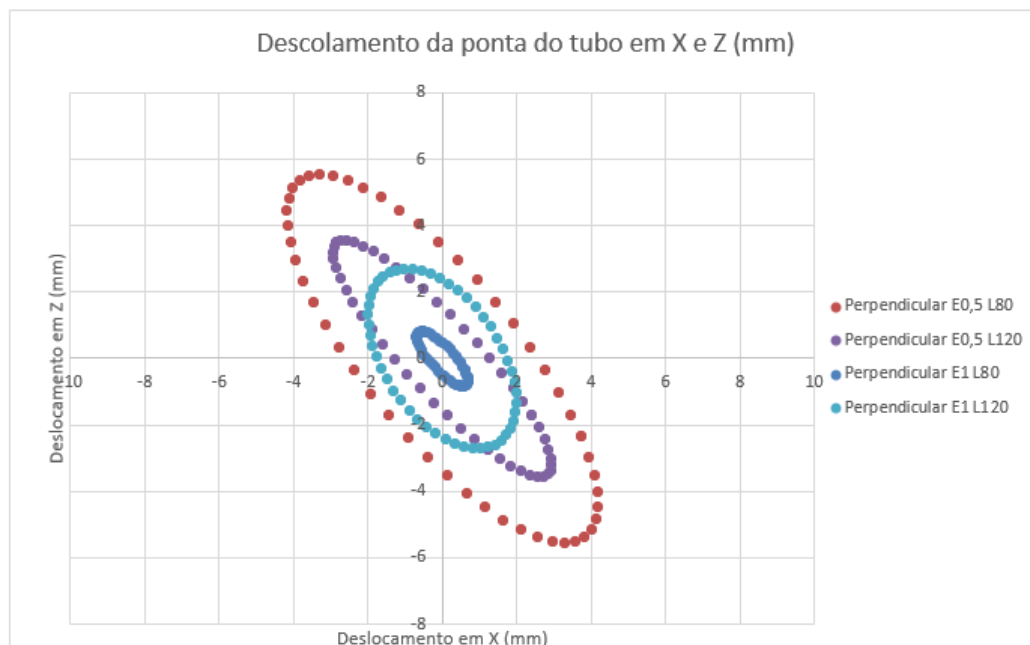


Figura 68 - Curvas de *Lissajous* para sistemas estudados (configuração perpendicular)

Tendo os deslocamentos resultantes e as frequências de excitação, calcula-se os coeficientes de potência para cada sistema. O resultado está apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Coeficiente de potência em sistemas com piezelétricos em configuração perpendicular

<i>Protótipo</i>	<i>Frequência de excitação (Hz)</i>	<i>Deslocamento resultante máximo (mm)</i>	<i>Coeficiente de potência (mm.Hz)</i>
Perpendicular E0,5 L80	175,1	6,6	1152,4
Perpendicular E0,5 L120	61,9	4,5	278,3
Perpendicular E1 L80	189,7	0,5	97,5
Perpendicular E1 L120	61,7	3,0	182,2

Os sistemas que possuem maior coeficiente de potência e possuem deslocamentos próximos a uma circunferência são os “Perpendicular E0,5 L80” e “Perpendicular E0,5 L120”. Esses foram os sistemas perpendiculares escolhidos para serem prototipados.

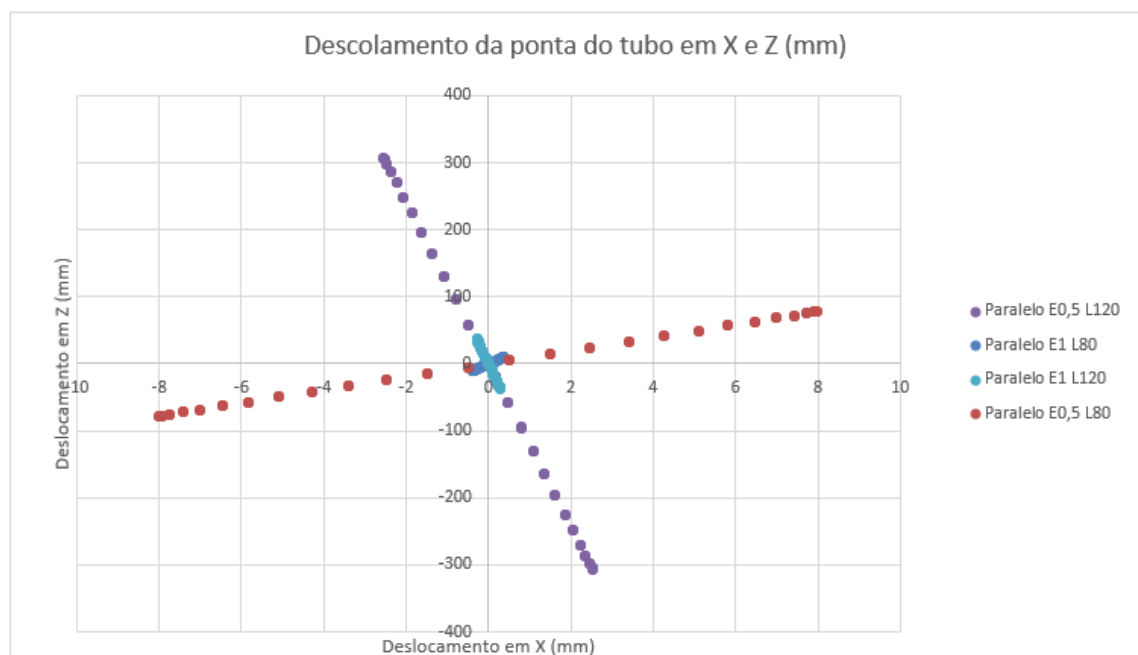
7.2 SISTEMAS COM PIEZELÉTRICOS EM CONFIGURAÇÃO PARALELA

Análogo ao sistema perpendicular, os sistemas simulados foram: Paralelo E0,5 L80; Paralelo E0,5 L120; Paralelo E1 L80; Paralelo E1 L120. Excitou-se os quatro sistemas nas duas primeiras frequências de ressonância, escolheu-se, então, o maior deslocamento entre as duas frequências e compilou-se os deslocamentos resultantes na Figura 69.

Tabela 12 - Frequências modais e de excitação do sistema

Posicionamento Piezo	Paralelo			
Espessura (mm)	0,5		1,0	
Comprimento (mm)	80	120	80	120
Freq. de excitação (Hz)	196	64,20	208,8	66

Análogo à sessão anterior, utilizou-se o resultado da resposta de fase da análise harmônica, para desenhar as curvas de *Lissajous* para cada sistema, como apresentado na Figura 69.

Figura 69 - Curvas de *Lissajous* para sistemas estudados (configuração paralela)

Calculou-se os coeficientes de potência para cada sistema, apresentado na Tabela 13

Tabela 13 – Coeficiente de potência em sistemas com piezelétricos em configuração paralela

<i>Protótipo</i>	<i>Frequência de excitação (Hz)</i>	<i>Deslocamento de resultante máximo (mm)</i>	<i>Coeficiente de potência (mm.Hz)</i>
Paralelo E0,5 L80	195,6	78,3	15312,6
Paralelo E0,5 L120	64,2	308,0	19770,4
Paralelo E1 L80	208,8	9,5	1984,4
Paralelo E1 L120	61,7	36,4	2245,2

Com base nos mesmo critérios usados na sessão anterior, os sistemas que possuem maior coeficiente de potência são os “Paralelo E0,5 L80” e “Paralelo E0,5 L120”. Esses foram os sistemas perpendiculares escolhidos para serem prototipados.

8 FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO^[EB4]

Após etapa a de modelagem e simulação, construiu-se um protótipo experimental, para validação do estudo computacional. O protótipo foi desenvolvido levando em consideração a replicabilidade do protótipo com equipamentos disponíveis em laboratórios de fabricação (ex: FabLab).

O mecanismo projetado é composto por três peças: o tubo, a base e os piezelétricos. Os materiais utilizados foram respectivamente: Tubo microcapilar de cobre usado em soldagem (1x0,7x150mm); chapa de alumínio 3003 (230x75x3mm) e piezelétrico PZT-5A (1mm e 0,5mm de espessura). Para a união entre as peças foram usados resina epóxi Araldite® Profissional, resina epóxi condutível CW2400 CircuitWorks Conductive Epoxy e resina Loctite Durepoxi®. Os equipamentos utilizados foram: serra fina; lima fina; guilhotina para chapas metálicas; dobradeira; furadeira de bancada; e IsoMet5000. Para prototipagem em laboratório de fabricação pode-se utilizar serra para metais no lugar da guilhotina; morsa de bancada e martelo no lugar de dobradeira, pois não há necessidade de precisão na dobra; e requisitar ao fornecedor os piezelétricos na dimensão final, para não necessitar usinagem. A escolha do tipo de resina e seu método de colagem é de suma importância para o resultado do protótipo (ANDRES SALAS VARELA, 2017). Como este material pode atuar como um amortecedor, o uso em excesso ou o mau uso, acarretam em deslocamentos extremamente pequenos na ponta do tubo, não gerando fluxo em seu interior.

A fabricação do protótipo pode ser dividida em usinagem e montagem, etapas que serão descritas detalhadamente abaixo.

8.1 USINAGEM

A usinagem do protótipo é simples, mas exige alguns cuidados para obter o resultado esperado. O tubo foi fixado entre borrachas em uma morsa para não o amassar e então cortado com serra fina, para não entupir o furo. Em seguida, limou-se as laterais para melhor aderência do Piezelétrico. A base de alumínio foi cortada usando guilhotina, furada e então dobrada. O Piezelétrico foi cortado com uma IsoMet5000 com velocidade do disco à 700 rpm e avanço de 1,2 mm/min.

8.2 MONTAGEM

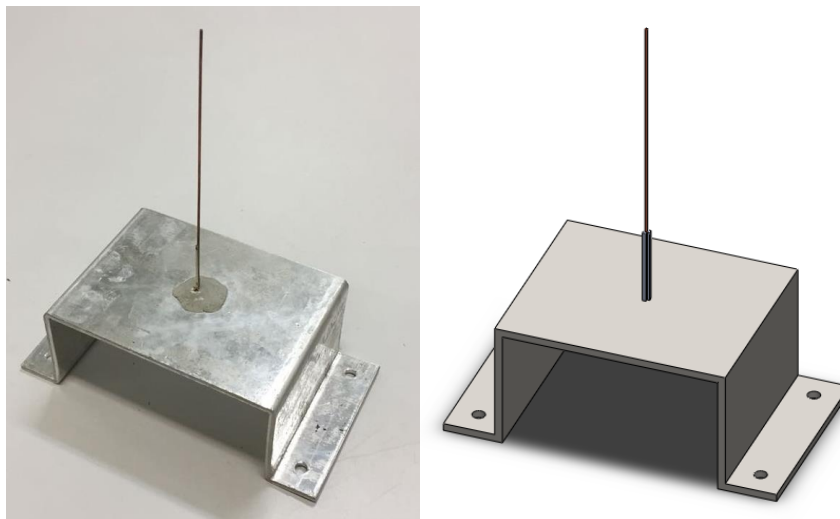
Por apresentar dimensão reduzida, montagem usando resina epóxi e alta fragilidade do piezelétrico, uma falta de rigor na montagem do protótipo, acarreta grandes diferenças de resultados, como protótipo não funcional, frequência de ressonância diferente da simulação ou deslocamentos muito reduzidos.

Os dois Piezelétricos foram acoplados à superfície externa do tubo com duas resinas epóxi Araldite® Profissional e CW2400, assegurando o paralelismo entre o maior eixo do Piezelétrico e o eixo axial do tubo. A escolha de duas resinas na colagem se deu pelo fato de que a Araldite® Profissional possui maior fixação, mas é isolante e a CW2400 Epoxy possui menos fixação, mas é condutiva. Sendo assim, 90% da superfície de contato foi preenchida com Araldite® Profissional e 10% da superfície de contato foi preenchida com a CW2400 Epoxy, garantindo então que os dois piezelétricos estão em curto circuito com o tubo.

O tubo foi colado à base utilizando a resina Loctite Durepoxi®, pois quando curada, possui alta rigidez, garantindo fixação próxima ao engastamento entre os componentes. A maior parte da resina foi adicionada entre o tubo e a parte inferior da base, para não interferir muito na frequência de ressonância.

Os fios elétricos foram soldados diretamente na face externa do piezelétrico, entretanto tal processo deve ser feito com extrema atenção, pois altas temperaturas despolarizam o Piezelétrico. Uma solução alternativa é soldar o fio à uma fita de cobre e então colar esta à superfície do piezelétrico.

A Figura 70 apresenta o resultado de um dos protótipos fabricados comparado com o modelo computacional.



8.3 CUSTO

O preço aproximado de cada protótipo foi de R\$20,85 para os protótipos com piezelétricos em configuração paralela e R\$29,35 para os protótipos com piezelétricos em configuração perpendicular como indicado na Tabela 14.

Tabela 14 – Custos de material para fabricação do protótipo

Configuração do piezelético	Custo aproximado (R\$/Protótipo)	
	Paralelo	Perpendicular
Araldite profissional Normal 234g 24hrs	0,10	0,10
Durepoxi	0,25	0,25
Epoxi condutor	1,00	1,00
Tubo	4,50	4,50
Piezo	5,00	14,00
Alumínio	10,00	10,00
Total	20,85	29,35

Sendo um dos requisitos do projeto, o baixo custo (menos que 50 reais) do protótipo foi validado.

9 ENSAIOS^[EB5]

9.1 VELOCIDADE E DESLOCAMENTO

Posteriormente à fabricação dos protótipos, foram realizados testes com os mesmos para validação dos resultados obtidos nas simulações. Na realização dos ensaios uma configuração de equipamentos foi utilizada, conforme Figura 71, para se obter a velocidade do deslocamento da extremidade superior do tubo de metal do protótipo.

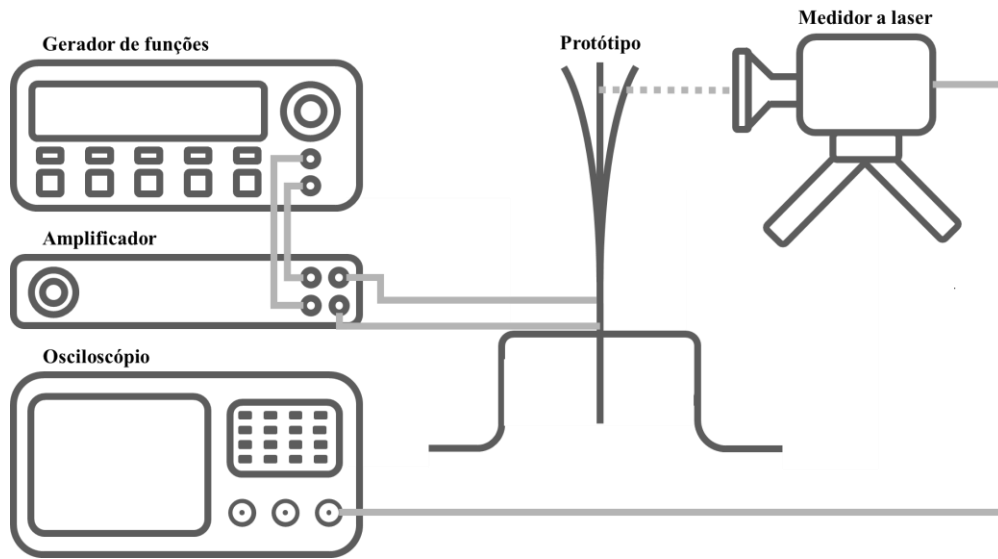


Figura 71 – Esquemático do ensaio de velocidade e deslocamento

Um gerador de funções, modelo *Agilent 33120 – 15MHz Function/Arbitrary Waveform Generator*, foi utilizado junto com um amplificador *Taramps TL-600* para realizar a excitação das pastilhas piezelétricas em frequências desejadas. A leitura da velocidade de deslocamento foi realizada através de um rastreador a laser para medições de vibrações modelo OFV-534, seu respectivo controlador OFV-5000 e um osciloscópio *Agilent infiniiium MSO8104A*. Todos os equipamentos mencionados podem ser encontrados na Figura 72.



(a)



(b)



(c)

Figura 72 - Gerador de Funções (a), Osciloscópio (b) e conjunto Laser-Controlador (c) utilizados

Para que os testes fossem consistentes com todos os protótipos, foi elaborado previamente um padrão de montagem do ensaio que foi repetido para todos os protótipos. Primeiramente corta-se um pedaço quadrado de papel refletor de 4mm e o prende na extremidade superior do tubo de metal da bomba. As pastilhas são então ligadas no gerador de funções através de um fio que está soldado a face externa da mesma e do próprio tubo de metal que possui conexão com a face interna da pastilha, conforme Figura 73. Na configuração perpendicular é necessário realizar o ensaio para cada piezelétrico separadamente sendo que o piezelétrico que não está sendo excitado deve ser aterrado em ambas as faces.

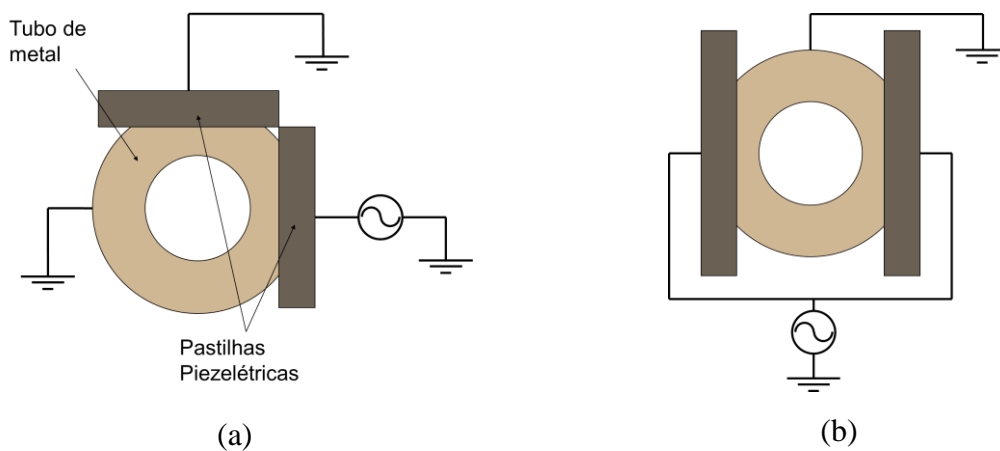


Figura 73 - Esquemático das ligações elétricas para a configuração perpendicular (a) e paralelo (b)

Realizada as ligações elétricas, a base de madeira do protótipo é fixa na mesa com uma morsa (Figura 74 (a)), o laser angulado paralelamente ao chão (Figura 74(b))e focado a uma distância de 300mm (Figura 74(c)), medidos entre a lente do equipamento a extremidade do tubo de metal, no centro no papel refletivo que foi colado anteriormente.

Para garantir que o laser capte o maior deslocamento possível, é preciso que ele esteja paralelo ao movimento realizado pela extremidade superior do tubo de metal. Para que isso ocorra, a partir da análise modal realizada na modelagem computacional, foi possível determinar para cada configuração qual deve ser o posicionamento do laser. Na configuração perpendicular o laser deve estar a 45° contados a partir da linha de centro da pastilha piezelétrica. Como há duas possibilidades para se considerar esse ângulo, girando o protótipo no sentido anti-horário ou horário, ambas as situações são testadas para cada pastilha e opta-se pelo ângulo que apresentar maior nível de sinal na frequência de ressonância. Já para o caso da configuração paralela o laser deve ser posicionado perpendicularmente a face externa da

pastilha piezelétrica. Uma ilustração dos posicionamentos mencionados pode ser vista na Figura 75.

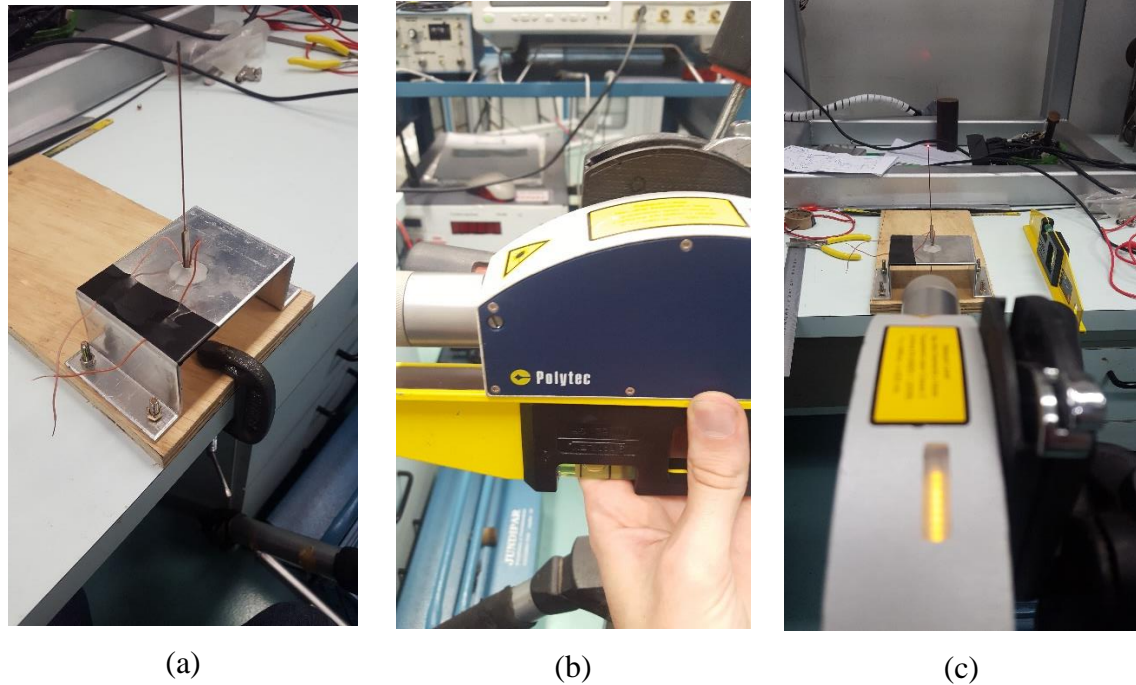


Figura 74 - Preparação do ensaio, sendo a (a) fixação do protótipo na mesa, (b) nivelamento do laser, (c) foco do laser no papel refletor

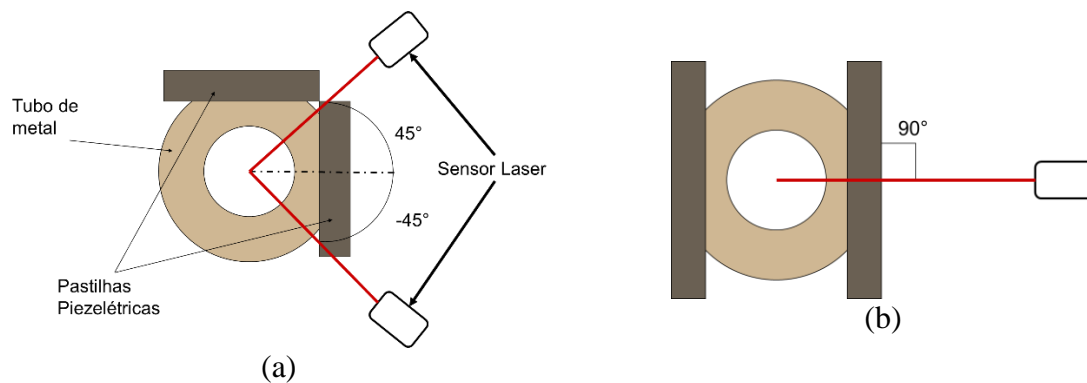


Figura 75 – Vista superior do protótipo para ilustração do posicionamento do laser para a configuração perpendicular (a) e paralela (b)

A leitura do sinal do laser foi realizada no osciloscópio da saída que corresponde a velocidade do deslocamento medido. Essa escolha se deu pois esse é o sinal com menos ruídos que poderia ser obtidos pelo controlador do laser. Essa conclusão ocorreu após testes com a outra saída disponível de deslocamento medido. Como nas simulações realizadas obtemos valores de deslocamento da face superior do tubo, foi necessário integrar o sinal obtido. Isso foi realizado no próprio osciloscópio através de função matemática presente no próprio *software* do aparelho. A Figura 76 apresenta um *printscreen* da tela do osciloscópio durante um dos

ensaios no qual é possível ler os valores de tensão pico-a-pico do sinal em cor amarela, que representa a velocidade do deslocamento, e do sinal em cor roxa que é a integral do outro sinal e representa o deslocamento medido. Para converter os valores de tensão para valores de velocidade e deslocamento efetivos foi necessário multiplicá-los pelo *range* utilizado pelo controlador do laser no momento de cada leitura da tensão no osciloscópio.

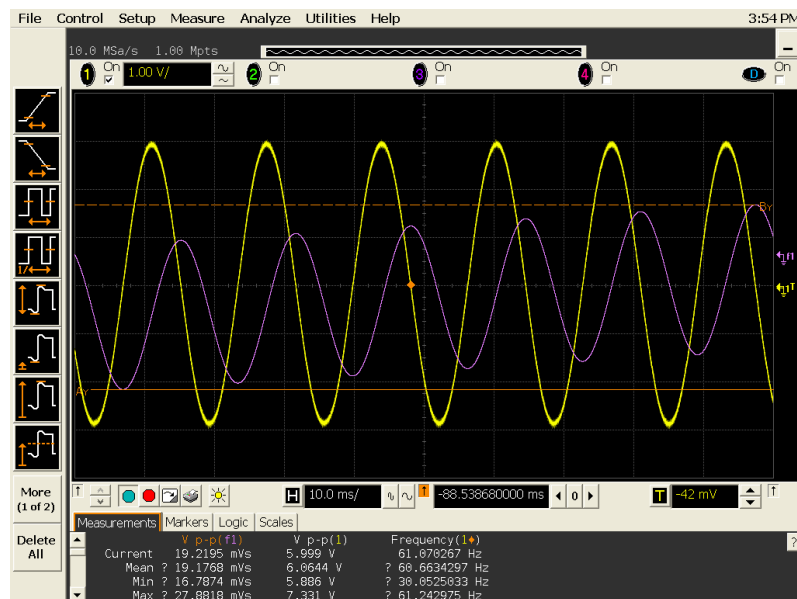


Figura 76 - Tela do osciloscópio durante os ensaios

9.2 FLUXO

Os ensaios para obtenção dos fluxos de água dos protótipos foram realizados utilizando a configuração de equipamentos demonstrado na Figura 77 . A bomba piezelétrica foi conectada na parte inferior a um recipiente com água através de um tubo de borracha, as pastilhas piezelétricas acionadas e um papel absorvente foi posicionado próximo a ponta do protótipo para captar toda água que era expelida pelo tubo. A diferença de peso entre o papel antes e após o ensaio e o tempo de captação da água pelo papel forneciam o valor da vazão de fluxo do protótipo.

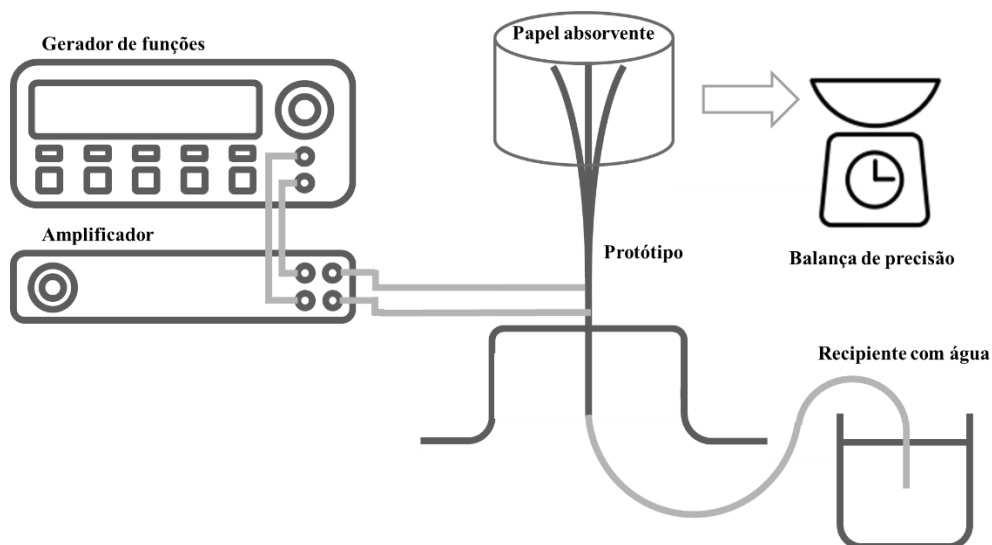


Figura 77 – Esquemático do ensaio de fluxo

O acionamento das pastilhas piezelétricas se deu na forma completa, ou seja, utilizando todas elas e na configuração final utilizada durante a análise harmônica. Um esquemático da ligação elétrica da configuração perpendicular pode ser visualizado na Figura 78 e da configuração paralela repete-se o esquemática da Figura 73 (b).

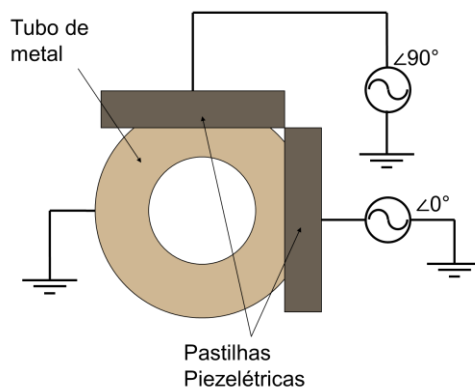


Figura 78 - - Esquemático da ligação elétrica para a configuração perpendicular

Antes e após cada ensaio o papel absorvente era pesado em uma balança de precisão. Isso permitia calcular massa de água que era expelida pela bomba em décimos de milésimos, conforme precisão da balança. O tempo de captação da água expelida pela bomba foi estabelecido de 3 minutos para que se pudesse obter uma quantidade razoável de massa para a pesagem.



Figura 79 – Procedimento de pesagem na balança de precisão do papel absorvente

10 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO E ENSAIOS

Para a validação das simulações elaboradas no ANSYS conforme a metodologia descrita na sessão 4, quatro modelos foram selecionados para serem construídos. A escolha se deu pelos métodos apresentados na sessão 7 e apresentam características com maior potencial para apresentar fluxo de fluido. Esses modelos foram então ensaiados conforme descrição no item 9 e os valores obtidos foram comparados com os valores obtidos do *software* de simulação. Os seguintes valores foram comparados e serão descritos adiante:

- Frequência natural de vibração
- Resposta em frequência

Valores de fluxo não foram simulados neste trabalho devido a sua complexidade, assim o ensaio de fluxo teve como objetivo averiguar o funcionamento da bomba. Valores obtidos foram então comparados com estudos semelhantes realizados por outros pesquisadores.

Outro ponto de validação das simulações foi o modo de vibrar do tubo de metal. O *software* ANSYS permite uma visualização gráfica no modo de vibrar de cada modelo, conforme Figura 56 a Figura 59. O protótipo testado “Paralelo E0,5 120” quando acionado por uma tensão de 100 V apresentou um deslocamento da extremidade superior do tubo de metal visível a olho nu. Assim, somente nesse protótipo, foi possível comparar o primeiro modo de vibrar simulado e o real conforme Figura 80.

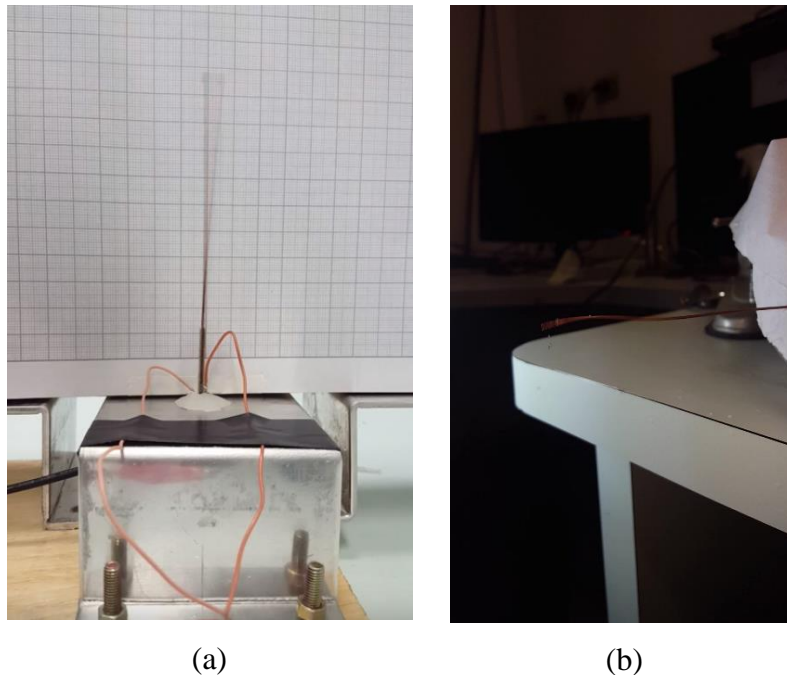


Figura 80 – Primeiro modo de vibrar do protótipo “Paralelo E0,5 120”, capturado tempo de obturador da câmera maior (a) e um menor (b)

10.1 COMPARAÇÃO ENTRE FREQUÊNCIAS NATURAIS TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS

Observando as Tabela 15 e Tabela 16, nota-se que embora as frequências de ressonância da simulação possuam mesma ordem de grandeza que as frequência medidas em ensaio, o erro entre elas é alto. Percebe-se que esse erro varia muito, independentemente do modo de vibrar, do comprimento do tubo, da espessura e da configuração do piezelétrico. Tem-se como hipótese que esses erros são altos e inconstantes pois:

- 1) A usinagem e montagem do protótipo são imprecisas e inconstantes.
- 2) As condições de contorno entre o tubo e o piezelétrico e base, foram definidas como engastada. Entretanto, tanto o Araldite profissional, como o Durepoxi, possui um pouco de amortecimento.
- 3) O tubo de cobre comprado não possuía especificações do material. Ou seja, as parametrizações do material utilizadas na simulação foram valores pré-definidos do programa e não necessariamente refletem a realidade.

Tabela 15 - Frequências naturais teóricas e experimentais dos sistemas com piezelétricos em configuração perpendicular

Posicionamento do piezo	<i>Perpendicular</i>					
Espessura (mm)	0,5					
Comprimento (mm)	80			120		
	Teórico	Real	Erro	Teórico	Real	Erro
1º Modo (Hz)	174,0	132	24%	60,9	50	18%
2º Modo (Hz)	176,3	134	24%	62,9	56	11%
3º Modo (Hz)	723,7	640	12%	350,9	290	17%
4º Modo (Hz)	748,9	650	13%	362,0	330	9%

A Tabela 16 apresenta apenas os modos de vibrar 1 e 3, pois os ensaios foram feitos com o laser normal à face do piezelétrico. Sendo assim, os deslocamentos que ocorriam perpendicular ao laser, não eram possíveis de serem medidos. Como os modos de vibrar 2 e 4 ocorrem paralelamente ao laser, para medi-los é necessário girar o laser de 90°. Como esses modos de vibrar possuem baixa amplitude, não houve interesse em estudá-los.

Tabela 16 - Frequências naturais teóricas e experimentais dos sistemas com piezelétricos em configuração paralela

Posicionamento do piezo	<i>Paralelos</i>					
Espessura (mm)	0,5					
Comprimento (mm)	80			120		
	Teórico	Real	Erro	Teórico	Real	Erro
1º Modo (Hz)	193,38	140	28%	65,0	60	8%
3º Modo (Hz)	733,86	470	36%	387,2	376	3%

10.2 COMPARAÇÃO ENTRE RESPOSTA À FREQUÊNCIA NATURAIS TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS

Como explicado na sessão 9.1, o gráfico de resposta à frequência experimental foi feito com velocidade e então integrado para ter o deslocamento. Sendo assim, a comparação entre os gráficos de resposta à frequência experimental e teórico foram em relação à velocidade como apresentado da Figura 81 a Figura 84.

Os intervalos de frequências escolhidas contemplam o primeiro e segundo modo de vibrar. Para simulações que geraram os gráficos reais apresentados da Figura 81 a Figura 84 , foi calculado um *Damping ratio* tal que os valores de amplitude fossem próximos do real.

Como é possível observar da Figura 81 a Figura 84, os gráficos teóricos da configuração perpendicular apresentam duas frequências de ressonância bem claras, enquanto os reais apresentam uma frequência clara e uma segunda de amplitude bem menor e não tão clara. Já a configuração paralela apresenta um pico bem claro tanto no real como no teórico.

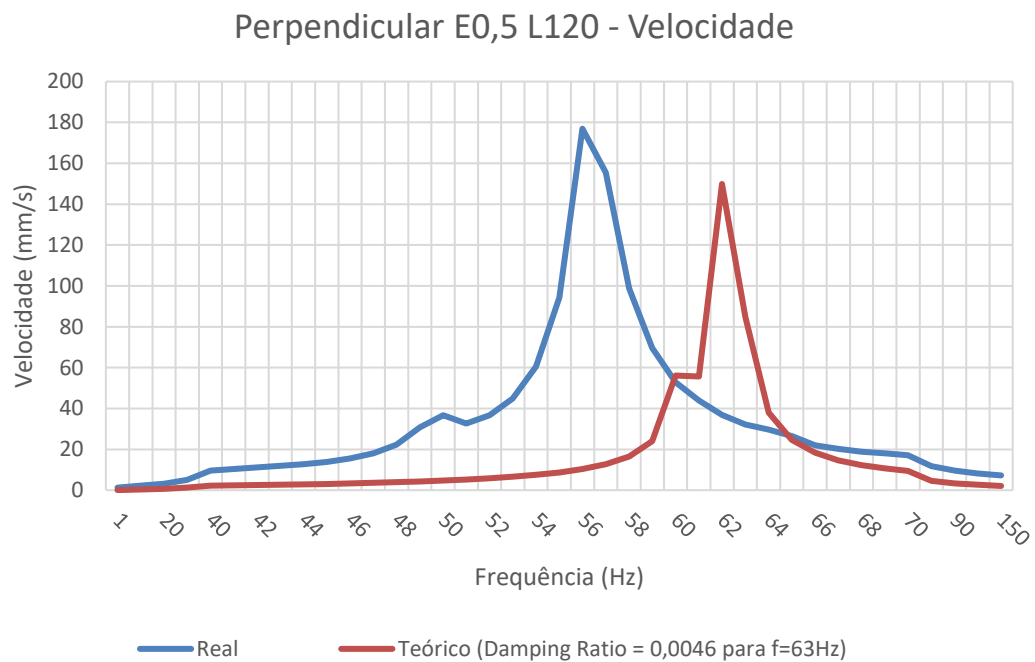


Figura 81- Resposta à frequência real e teórica do protótipo “Perpendicular E0,5 L120”

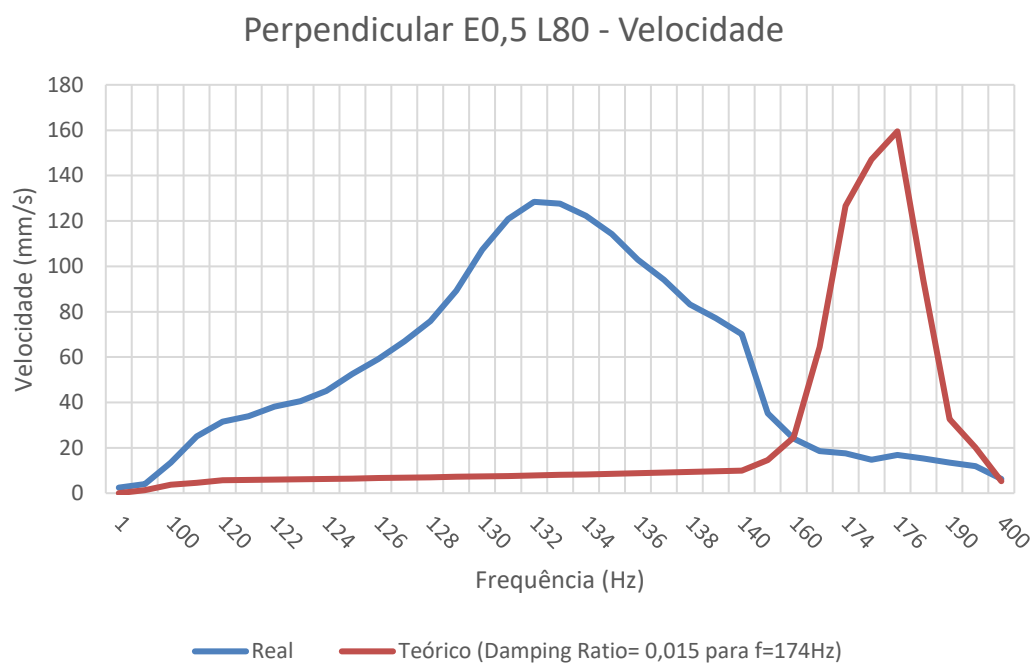


Figura 82 - Resposta à frequência real e teórica do protótipo “Perpendicular E0,5 L80”

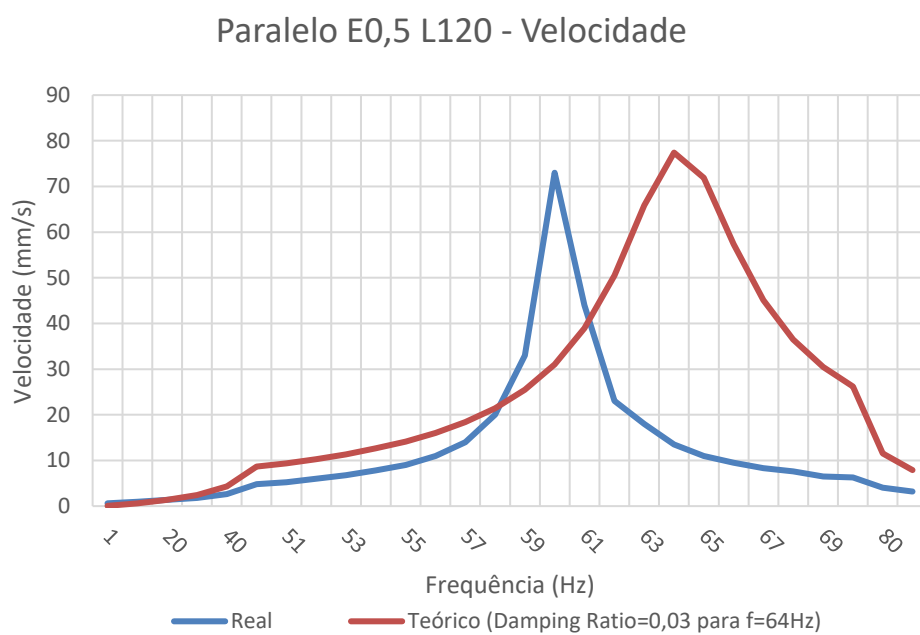


Figura 83 - Resposta à frequência real e teórica do protótipo “Paralelo E0,5 L120”

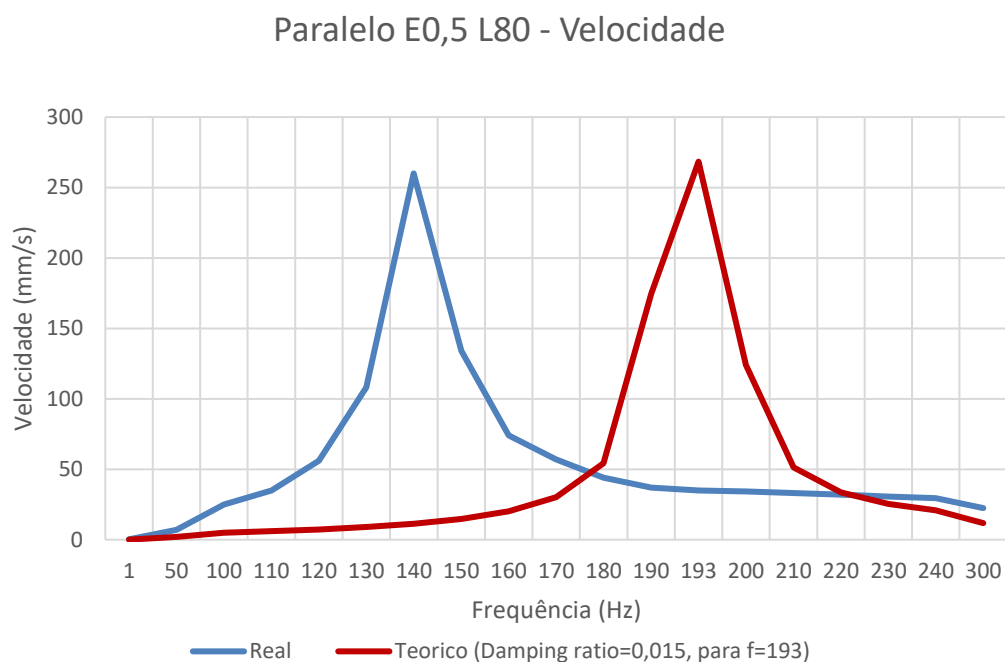


Figura 84- Resposta à frequência real e teórica do protótipo “Paralelo E0,5 L80”

10.3 FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA COM ÁGUA

Ao testar os diferentes protótipos com e sem água no tubo (Figura 85) viu-se que a frequência de ressonância não muda, como visto na sessão 5.3.



Figura 85 – Sistema testado com água

10.4 FLUXO

Usando o ensaio descrito na sessão anterior, foram usados dois métodos para calcular o fluxo:

- 1) Deixar o tubo preenchido com água, mas sem fluxo (por meio de uma Válvula anti-retorno, ou posicionamento do reservatório de água). Ao ligar a bomba, a água que saísse do tubo seria medida com o papel e o fluxo seria calculado como a água expelida dividido pelo tempo de medição.
- 2) Garantir um fluxo constante na bomba (por meio do posicionamento do reservatório de água), medido com o mesmo método anterior. Ao ligar a bomba, a água que saísse do tubo seria medida com o papel e o fluxo resultante seria o fluxo com a bomba, subtraído pelo fluxo sem a bomba.

Ao testar o primeiro método a bomba não conseguiu expelir água enquanto pelo segundo método o fluxo calculado foi de 0,019ml/min, o que é considerado erro de medição. Neste método, quando a bomba estava desligada, o fluxo acumulava-se na ponta do tubo e pingava em grandes gotas, enquanto quando ligava-se a bomba havia um grande espalhamento de pequenas gotículas. Sendo assim, o protótipo não atendeu ao requisito de gerar fluxo do fluido, apenas espalhamento de fluxo existente.

Analisando os resultados apresentados nos artigos “Multi-Field Analysis and Experimental Verification on Piezoelectric Valve-Less Pumps Actuated by Centrifugal Force” (MA; PEI; CHEN, 2017). e “Miniature tubular centrifugal piezoelectric pump utilizing wobbling motion.” (MA et al., 2017), e baseado na equação (17), tem-se a hipótese que o protótipo testado não gerou fluxo do fluido, diferentemente dos protótipos dos artigos citados, pois:

- 1) O sistema escolhido possui frequência de ressonância baixa. Como a força centrífuga é diretamente proporcional ao quadrado da frequência, uma alteração no material do sistema ou tamanho do tubo pode aumentar a força centrífuga e talvez o coeficiente de potência.
- 2) O tubo utilizado possui raio interno pequeno. A força de amortecimento viscoso em tubos finos é muito grande, podendo ter superado a força motriz. Além disso, como a força centrífuga é diretamente proporcional ao quadrado da frequência, um raio interno maior, ocasionaria um aumento da força centrífuga e talvez do coeficiente de potência. É importante salientar que tubos de grande diâmetro interno e externo possuem maior rigidez e, conseqüentemente, menor deslocamento, o que ocasiona um menor coeficiente de potência, não gerando fluxo no tubo.
- 3) O método de colagem utilizados foi manual e a resina, embora profissional, não é a melhor do mercado. Sendo assim, uma resina e uma colagem melhor, aumenta a

transferência de movimento entre o piezelétrico e o tubo, gerando maior deslocamento e, como consequência, maior coeficiente de potência.

11 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo o estudo da metodologia de desenvolvimento de uma bomba centrífuga piezelétrica tubular de fluxo baseada em movimentos oscilatórios de baixo custo através da modelagem por Método dos Elementos Finitos (MEF) e posterior construção e caracterização de protótipos.

A simulação computacional que foi descrita nesse trabalho foi uma ferramenta essencial para o desenvolvimento da bomba piezelétrica em tempo hábil. Dentre diversas configurações, através das simulações, foi possível escolher aquelas com maior potencial para o bombeamento de fluxo antes mesmo de qualquer protótipo ter sido fabricado, ou seja, de maneira ágil e econômica. Ela auxiliou no cálculo do coeficiente de potência, na obtenção de deslocamentos lineares de certas estruturas e na obtenção das frequências naturais de vibração para cada configuração de bomba proposta. Assim, todas as etapas da modelagem foram descritas e explicadas para um modelo, afim de facilitar a reprodução dessas simulações para melhoramento contínuo desse projeto como de outros que venham a se utilizar dessa análise.

Outra conclusão importante obtida das simulações foi a influência da água no interior do tubo de metal na frequência natural de vibração do sistema. As simulações demonstraram pouca variação nas frequências que foi comprovado posteriormente com a construção do protótipo.

A construção dos protótipos foi importante para a validação das simulações realizadas. Foi possível comparar os resultados obtidos computacionalmente com os valores obtidos dos protótipos e a partir dessa comparação encontrar pontos importante de melhoria para aproximar o protótipo da simulação computacional. Por parte do protótipo, deve-se fabrica-lo com resinas mais fortes e ter maior precisão na montagem/usinagem. Já por parte da simulação, os parâmetros do material podem ser mais refinados, assim como as condições de contorno, que devem incluir um amortecimento nos contatos proporcionados pela resina.

Os protótipos também permitiram conhecer a diferença na complexidade de acionamento da bomba para as configurações de posicionamento de pastilha piezelétrica testadas. Quando posicionadas perpendicularmente as pastilhas exigiam um acionamento mais complexo com fontes defasas de 90° entre si. Já para a configuração em paralelo apenas um sinal de tensão era necessário para se acionar a bomba, tornando-a mais simples frente a outra.

Como não se obteve fluxo do fluido nos protótipos fabricados, algumas melhorias que podem ser implementadas para garanti-lo são a escolha de sistemas que possuam alto

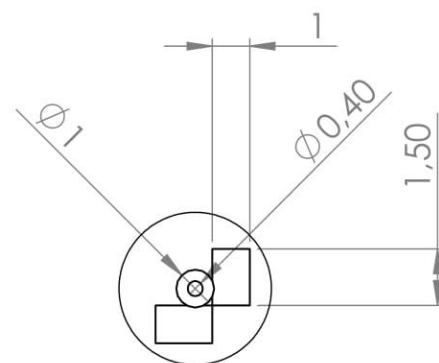
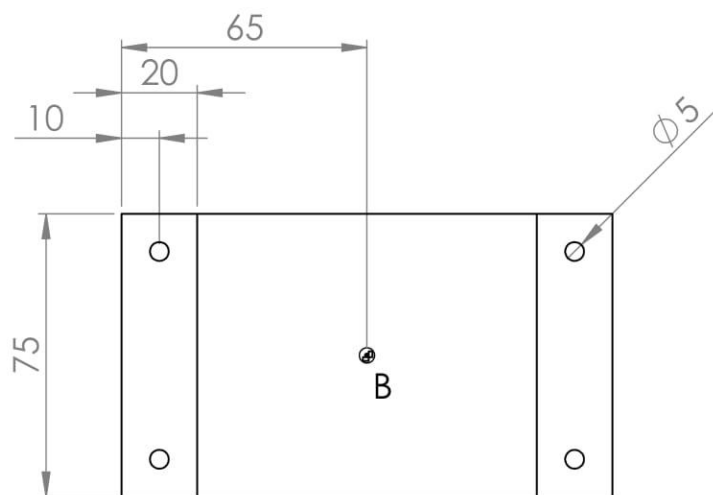
coeficiente de potência; tubos de raio interno suficientemente grande para evitar a força de amortecimento viscoso e pequeno o suficiente para não aumentar muito a rigidez do tubo e reduzir o coeficiente de potência; e utilizar resinas e métodos de colagem profissionais para garantir o máximo de transferência de movimento entre o piezelétrico e o tubo.

Por fim, foi possível a verificação e validação dos resultados obtidos computacionalmente comprovando a eficácia desse método para o desenvolvimento desse projeto, cumprido as restrições de fabricação, modelagem e custo propostas inicialmente. As análises aqui apresentadas demonstram o potencial desse projeto como do uso do modo de vibrar dessa estrutura para outros produtos.

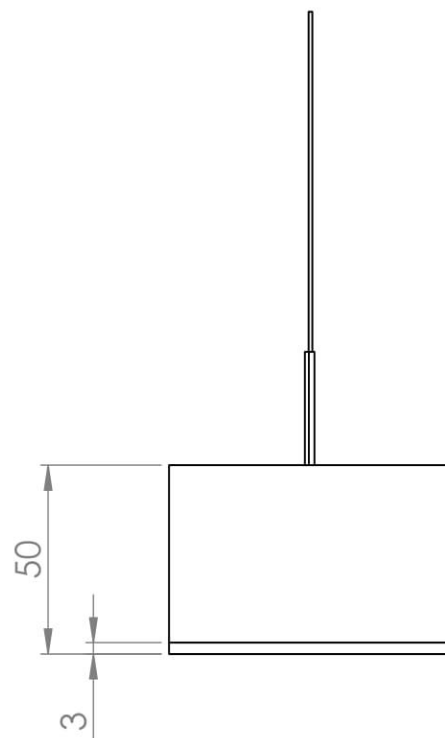
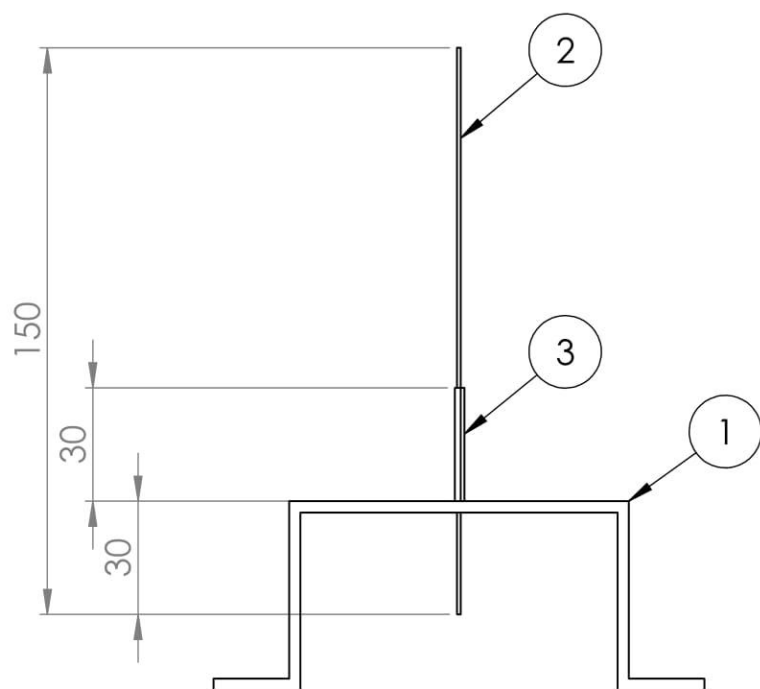
12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MA, Yu-Ting; PEI, Zhi-Guo; CHEN, Zhong-Xiang. **Multi-Field Analysis and Experimental Verification on Piezoelectric Valve-Less Pumps Actuated by Centrifugal Force**. Chinese Journal of Mechanical Engineering, v. 30, n. 4, p. 1032-1043, 2017.
- MA, Yu Ting et al. **Miniature tubular centrifugal piezoelectric pump utilizing wobbling motion**. Sensors and Actuators A: Physical, v. 157, n. 2, p. 322-327, 2010.
- STEMME, Erik; STEMME, Göran. **A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump. Sensors and Actuators A: physical**, v. 39, n. 2, p. 159-167, 1993.
- CHOI, Andres. **Desenvolvimento de uma bomba de fluxo piezelétrica de diafragma**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- LASER, Daniel J.; SANTIAGO, Juan G. **A review of micropumps**. Journal of micromechanics and microengineering, v. 14, n. 6, p. R35, 2004.
- KO, Hyun-Phill; JEONG, Hoseop; KOC, Burhanettin. **Piezoelectric actuator for mobile auto focus camera applications**. Journal of electroceramics, v. 23, n. 2-4, p. 530, 2009.
- JUNWU, Kan et al. **Design and test of a high-performance piezoelectric micropump for drug delivery**. Sensors and Actuators A: Physical, v. 121, n. 1, p. 156-161, 2005.
- VAN LINTEL, H. T. G.; VAN DE POL, F. C. M.; BOUWSTRA, S. **A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon**. Sensors and actuators, v. 15, n. 2, p. 153-167, 1988.
- VAZQUEZ CARAZO, Alfredo. **Piezoelectric transformers: An historical review**. In: Actuators. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2016. p. 12.
- IKEDA, Takurō. **Fundamentals of piezoelectricity**. Oxford university press, 1996.
- ANDRES SALAS VARELA, Ruben. **Projeto Dinâmico de Estruturas Piezocompósitas Laminadas (EPLA) utilizando o Método de Otimização Topológica (MOT)**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo
- ANSYS. **Workshop 1: Piezoelectric Fan. Piezo & MEMS ACTx**. Manual do ANSYS sobre a extensão “Piezo And MEMS ACT Extension”, 2017

APÊNDICE A – DESENHO DE CONJUNTO



DETALHE B
ESCALA 5 : 1



PMR 3550 - Trabalho de conclusão de curso
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo

Sistema com piezeletricos em
configuração perpendicular

No	Pecas	Material	Qtd
1	Base	Aluminio 3003	1
2	Tubo	Cobre	1
3	Piezeletrico	PZT-5A	2

TÍTULO:
Bomba centrifuga piezeletrica
tubular de fluxo baseada
em movimentos oscilatorios

DES. Nº

Desenho de conjunto

A4

ESCALA: 1:2

FOLHA 1 DE 1