



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola Politécnica

MODELAGEM E CONSTRUÇÃO DE UM MOTOR PIEZELÉTRICO
ROTATIVO DE ONDAS PROPAGANTES

Gilles Pierre Loïc Thomas

São Paulo

2013

Gilles Pierre Loïc Thomas

MODELAGEM E CONSTRUÇÃO DE UM MOTOR PIEZELÉTRICO ROTATIVO DE ONDAS PROPAGANTES

Relatório final apresentado à disciplina
PMR 2500/2550 – PROJETO DE
CONCLUSÃO DE CURSO.

Orientador:

Prof. Dr Emílio Carlos Nelli Silva

São Paulo

2013

Ficha Catalográfica

Thomas, Gilles Pierre Loïc

Modelagem e construção de um motor piezelétrico rotativo de ondas propagantes / G.P.L. Thomas. – São Paulo, 2014. 48 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

**1.Atuadores piezelétricos (Simulação computacional)
2.Ultrassom 3.Método dos elementos finitos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.**

Agradecimentos

Agradeço o Professor Emílio Carlos Nelli Silva, pela orientação e ajuda durante o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço os membros do laboratório de ultrassom do departamento da mecatrônica pelo auxílio inestimável, em particular Timóteo Francisco de Oliveira para o seu trabalho com as cerâmicas piezelétricas.

Agradeço os técnicos da oficina da engenharia mecatrônica, pelo empenho na construção dos protótipos desse projeto.

Agradeço também os alunos Luís Fernando Nogueira e Jaqueline Kian pelas dicas e ajuda, com as simulações e o funcionamento do material, e Rodrigo Diana e Lucas Baptista pela ajuda com o português.

Resumo

Motores piezelétricos tem um papel muito importante, sendo robustos, facilmente miniaturizados e consumindo pouca energia, são utilizados em várias aplicações como foco de câmera, vibrador de celular, robótica, ou ainda no domínio aeroespacial, onde as temperaturas são pertos do zero absoluto. Sendo uma tecnologia comum atualmente e utilizadas em várias áreas, o objetivo desse trabalho foi projetar e fabricar um motor ultrassônico rotativo utilizando ondas propagantes. Para isso, foram realizadas simulações computacionais usando o software de elementos finitos Abaqus, de forma a, primeiro observar e entender o funcionamento desse tipo de motor, e segundo dimensionar corretamente todos os parâmetros desse motor a fim de otimizar ele. Enfim, foi construído e caracterizado um protótipo desse motor. No final, esse protótipo conseguiu se movimentar com sucesso.

Palavras-chave: Motor piezelétrico, motor ultrassônico, ondas propagantes, elementos finitos, simulação computacional

Abstract

Nowadays, piezoelectric motors have a very important role in modern industry, as they are robust, easily miniaturized and have low power consumption, for camera, mobile devices, robotic, and even in the aerospace where the harsh environment can lead to cryogenic temperatures. As this type of motor is very common and is used in various areas, the objective of this work was to project and build a piezoelectric rotative motor. In order to achieve this, computer assisted simulations were made with the finite elements software Abaqus to, first, understand the physics behind an ultrasonic motor, and secondly to optimize it. After that, a prototype was fabricated and a study in order to compare both results from the finite elements and the actual motor was done. In the end, this prototype successfully rotate.

Keywords: piezoelectric motor, ultrasonic motor, traveling wave, finite elements

Índice de figuras

Figura 1: Utilização dos motores ultrassônicos (USM) numa câmera (fonte: Canon)	11
Figura 2: Classificação dos motores ultrassônicos.....	13
Figura 3: Princípio de funcionamento de um motor linear, [He 1998]	14
Figura 4: Interior de um motor piezelétrico rotativo.....	15
Figura 5: Anel piezelétrico.....	17
Figura 6: Modelo simplificado do estator	18
Figura 7: Modelo do anel piezelétrico.....	19
Figura 8: Anel piezelétrico.....	21
Figura 9: Curva deslocamento em função da frequência de excitação	22
Figura 10: Curvas de Lissajous	23
Figura 11: Curvas de Lissajou para os diferentes materiais	24
Figura 12: Curvas de Lissajous para os diferentes valores da espessura do anel piezelétrico .	25
Figura 13: Curvas de Lissajous para diferentes valores de espessura do anel	26
Figura 14: Curvas de Lissajous para 90, 75 e 60 dentes	27
Figura 15: Deformação do anel vibrante.....	27
Figura 16: CAD do estator	28
Figura 17: Análise estática do estator com uma força de 200N.....	29
Figura 18: Análise estática do estator com um torque de 0,5 N.m.....	30
Figura 19: Primeira solução de mecanismo	31
Figura 20: Segunda solução de mecanismo	32
Figura 21: CAD de um pedaço de cerâmica.....	33
Figura 22: Colagem das cerâmicas no estator	34
Figura 23: Conjunto anel piezelétrico e estator.....	34
Figura 24: Motor aberto (cima), Motor fechado (baixo).....	35
Figura 25: Alimentação do motor	36
Figura 26: Deslocamento máximo em função da frequência	37
Figura 27: Leitura da condutância do impedímetro	38
Figura 28: Motor aberto	39
Figura 29: Rotação em função da tensão de alimentação	40

índice de tabelas

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos motores ultrassônicos.....	12
Tabela 2: : Propriedades mecânicas das cerâmicas	19
Tabela 3: Modos de vibrar do conjunto anel/piezo	20
Tabela 4: Comparação dos materiais.....	24
Tabela 5: Comparação das espessuras do anel piezelétrico	25
Tabela 6: Comparação das espessuras do anel vibrante	26
Tabela 7: Condutância do estator	37

Sumário

Agradecimentos	3
Índice de figuras	7
índice de tabelas	8
1. Introdução.....	11
1.1 Contexto	11
1.2 Classificação dos motores ultrassônicos	12
1.2.1 Motor de onda estacionária	13
1.2.2 Motor de onda propagante.....	14
1.3 Objetivos e motivação	15
2. Fundamentação teórica.....	16
2.1 Piezeletricidade	16
2.2 Geração de uma onda propagante.....	16
2.3 MEF Piezelétrico.....	17
3. Modelagem Computacional.....	18
3.1 Primeira modelagem.....	18
3.2 Análise modal.....	20
3.3 Análise harmônica	21
3.4 Escolha do material	24
3.5 Escolha da espessura do anel piezelétrico	25
3.6 Escolha da espessura do anel vibrante.....	26
3.7 Escolha do número de dentes do estator.....	27
4. CAD	28
4.1 CAD do estator.....	28
4.2 Mecanismo do motor.....	31
4.2.1 Primeira solução	31
.....	31
4.2.2 Segunda solução	32
4.3 Anel piezelétrico.....	33
4.3.1 CAD do anel piezelétrico	33
4.3.2 Colagem do anel piezelétrico no estator.....	33
5. Resultados experimentais	36
5.1 Configuração	36
.....	36
5.2 Frequência e amplitude de ressonância	36
5.3 Medida de impedância.....	37

5.4	Testes com o rotor livre.....	38
6.	Conclusão.....	41
7.	Anexo 1: Script para plotar as curvas de Lissajou.....	42
	Script Python para Abaqus:.....	42
	Script Matlab para plotar as curvas	42
8.	Anexo 2: Desenhos de fabricação do prototipo.....	44

1. Introdução

1.1 Contexto

Piezeletricidade é um fenômeno eletromecânico que junta a força mecânica com o campo elétrico em materiais cristalinos (cerâmicas, polímeros). Este efeito é um processo reversível, onde o efeito direto é uma geração interna de uma carga elétrica resultante de uma força mecânica aplicada, e o efeito reverso é uma geração interna de uma tensão mecânica resultante de um campo elétrico aplicado. O efeito direto é geralmente usado para sensores, por exemplo, de tensão mecânica, ou também para recarregar pequenas baterias, e o efeito reverso para controlar as vibrações de uma estrutura.

Hoje em dia, piezeletricidade tem uma grande importância para a engenharia moderna, sendo bastante utilizada para micro mecanismos, como, por exemplo, câmera, celular e atuadores para robôs [6], ou até o domínio aeroespacial [4], onde as condições do ambiente são extremas (temperaturas perto do zero absoluto, vácuo).

A maior utilização desse efeito reverso é na área dos motores ultrassônicos (USM, *ultrasonic motor*). Um motor ultrassônico é um motor elétrico utilizando as vibrações, geralmente geradas por atuadores piezelétricos, de um estator em contato com um rotor a fim de gerar um movimento, linear ou rotativo, por atrito. A figura 1 mostra a aplicação de um motor piezelétrico rotativo numa câmera.

O primeiro protótipo de motor piezelétrico foi construído por H.V. Barth em 1973, nos laboratórios da IBM. Embora essa pesquisa tenha sido descontinuada, ela serviu como o estudo inicial para o uso deste tipo de movimentação.

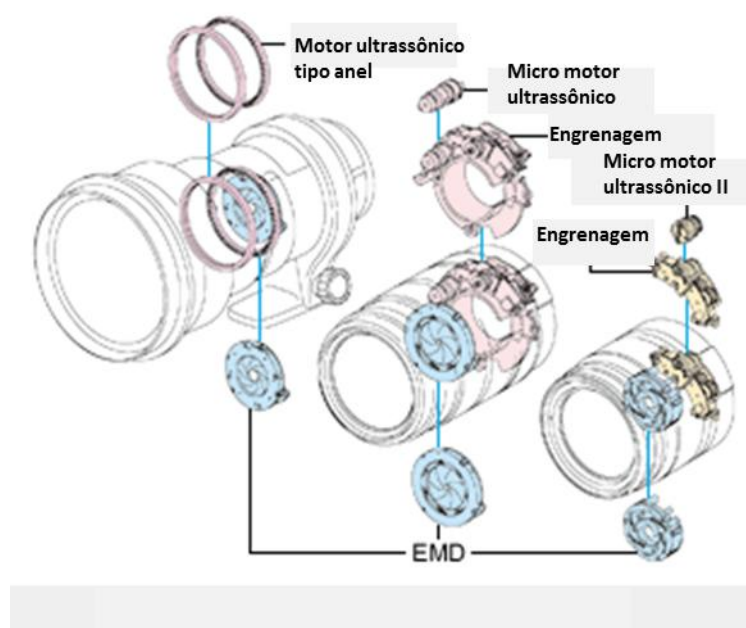


Figura 1: Utilização dos motores ultrassônicos (USM) numa câmera (fonte: Canon)

Os motores ultrassônicos foram objeto de várias pesquisas nos últimos 20 anos, devido a suas características únicas, como alto torque, resposta muito rápida, não gera campo magnético e alto torque sem excitação. Mas o contato por atrito entre o estator e o rotor abaixa a durabilidade e restringe a velocidade. A tabela 1 lista as vantagens e desvantagens dos motores ultrassônicos.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos motores ultrassônicos

Vantagens	Desvantagens
Compacto, simples estrutura	Baixa durabilidade
Alto torque sem excitação	Não adequado para atuadores grandes
Sem risco de interferência eletromagnética	Fonte de alta frequência e tensão necessária
Alto torque e baixa velocidade	
Silencioso	
Alta precisão	
Baixo custo de produção	

Existe no total 4 famílias de motor ultrassônico que foram desenvolvidos, mas pode-se classificá-los em duas grandes famílias os motores ultrassônicos lineares e os motores ultrassônicos rotativos. A seguir, uma breve apresentação de vários motores ultrassônicos em função do princípio de funcionamento deles.

1.2 Classificação dos motores ultrassônicos

A partir do modelo inicial, várias formas de construção foram propostas, conforme observado na figura 3.

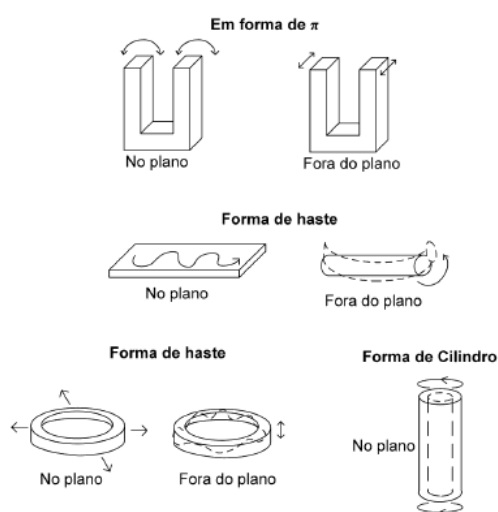


Figure 3: Formas de construção

Os motores ultrassônicos podem ser classificados em duas categorias: os motores cujo acionamento é realizado por uma onda estacionária ou uma onda propagante, e os motores com movimento linear o rotativo (figura 2).

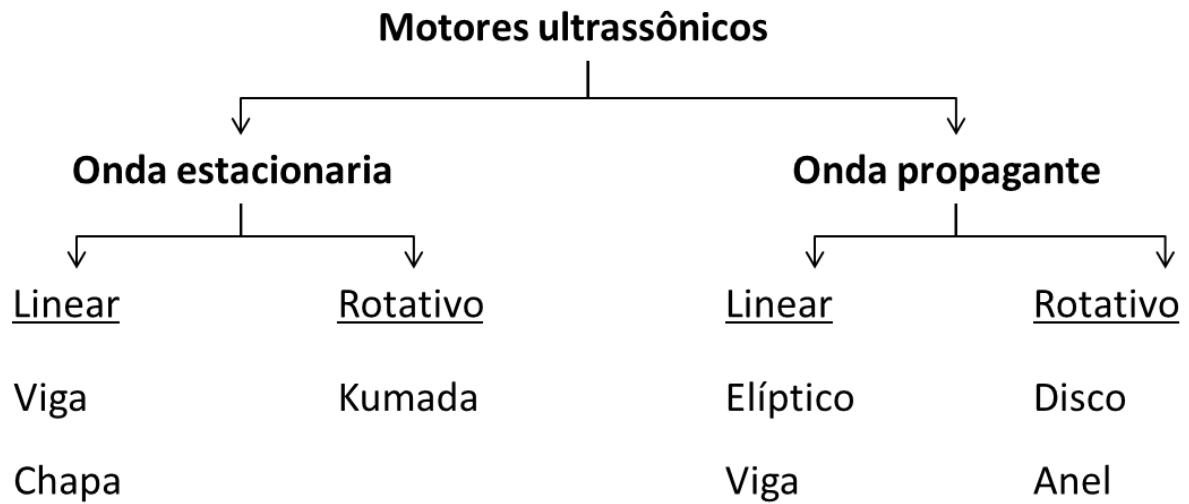


Figura 2: Classificação dos motores ultrassônicos

1.2.1 Motor de onda estacionária

Esse tipo de motor é aquele cuja cerâmica piezoelétrica, que é acionada por uma única fonte de tensão AC, é acoplada a um elemento que vibra. Esse tipo de montagem é chamada de acoplamento vibracional. Esse tipo de arranjo, devido a natureza do amortecimento, produz um movimento elíptico cuja geometria não é tão bem controlado. Portanto, esse tipo de motor apresenta a vantagem de ser barato e facilmente produzido, entretanto, devido a esse efeito do movimento elíptico e também devido a uma histerese em relação ao sentido de movimento.

Abaixo, dois exemplos de motores por onda estacionária: o primeiro, um motor com o seu arranjo clássico e o segundo, um motor torcional:

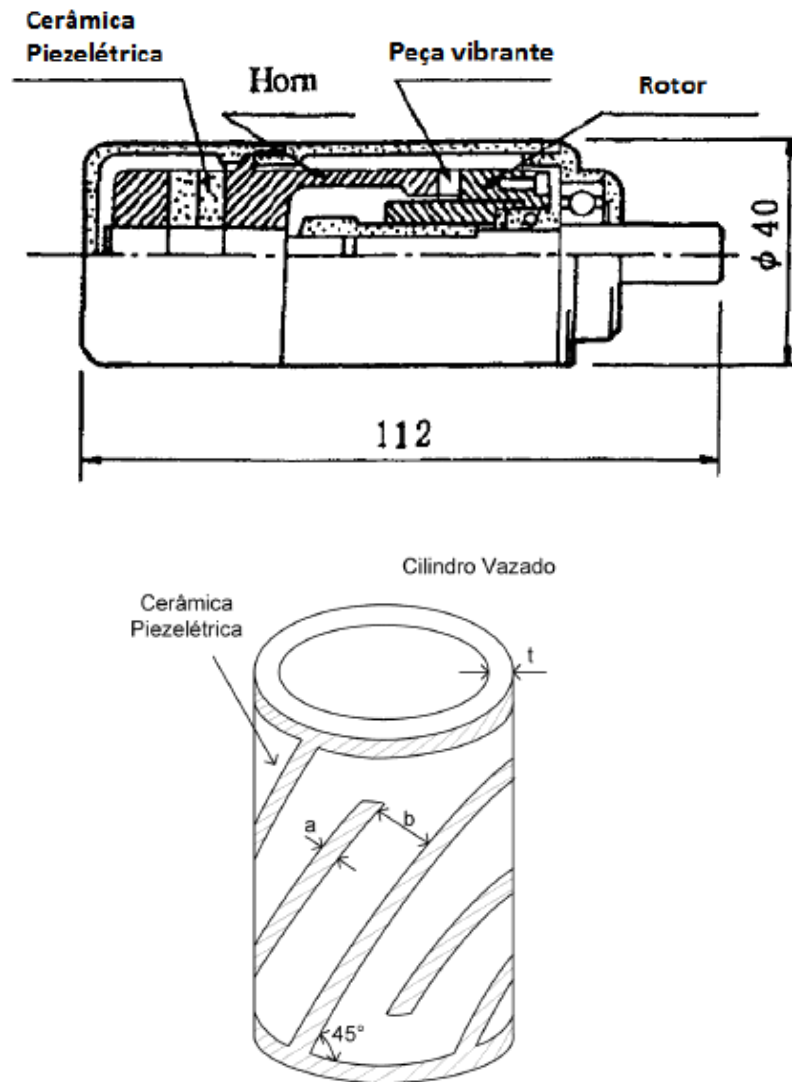


Figura 3: Princípio de funcionamento de um motor linear, [He 1998], e motor torcional

1.2.2 Motor de onda propagante

Este tipo de motor consiste num sólido que é excitado por atuadores piezelétricos para gerar uma onda progressiva na superfície dele, e um outro sólido que está em apoio sobre ele a fim de ser movimentado pelas forças de atrito. O deslocamento de um ponto fixo na superfície do primeiro sólido é elíptico, e a direção de propagação da onda define a direção de movimento do motor.

Diferentemente do motor de onda estacionária, o motor de onda progressiva exige duas fase de atuadores piezelétricos, que devem ser espaçadas entre si de um quarto de largura de onda. Cada fase vai gerar uma onda estacionaria que vão se somar e gerar uma onda progressiva (ver a demonstração na parte 2.2 *Geração de uma onda propagante* deste texto).

Portanto, precisa-se de duas fontes de tensão AC sinodais defasadas de 90° entre si para alimentar essas duas fases.

Um motor ultrassônico rotativo é composto por um estator, excitado por atuadores piezelétricos e um rotor, em contato com o estator, como descrito na figura 4.

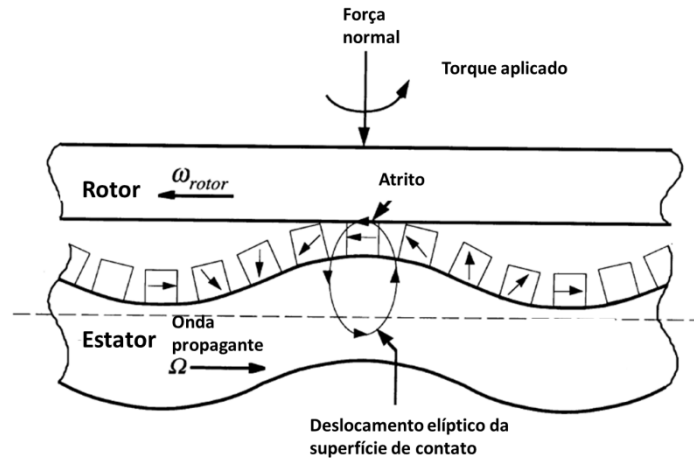


Figura 4: Interior de um motor piezelétrico rotativo

1.3 Objetivos e motivação

Os objetivos desse trabalho foram:

- Projetar um motor piezelétrico rotativo de onda propagante tipo anel, seguindo o modelo apresentado nos artigos [5] e [14];
- Simular modelo do motor utilizando *software* de elementos finitos;
- Construir protótipo e fazer validação experimental.

O princípio de funcionamento utilizando uma onda propagante para gerar um movimento de rotação sendo original, a possibilidade de fazer simulação computacional para otimizar o motor, e as várias aplicações desse tipo de motor foram minhas principais motivações para esse trabalho.

A fim de ter um ponto de comparação, as dimensões globais do protótipo desse trabalho são iguais àsquelas do artigo [5].

2. Fundamentação teórica

2.1 Piezeletricidade

As equações constitutivas da piezeletricidade são as seguintes:

$$\begin{cases} [T] = [C^E][S] - [e]^t\{E\} \\ \{D\} = [\varepsilon^S]\{E\} + [e][S] \end{cases}$$

onde:

$[T]$ - matriz de tensão mecânica

$[S]$ - matriz de deformação mecânica

$\{E\}$ - vetor campo elétrico

$\{D\}$ - vetor deslocamento elétrico

$[C^E]$ - matriz de rigidez elástica obtida a campo elétrico constante

$$[C^E] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$[e]$ - matriz piezelétrica de tensão mecânica

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$[\varepsilon^S]$ - matriz dielétrica obtida a deformação constante

$$[\varepsilon^S] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 Geração de uma onda propagante

Para gerar uma onda propagante no estator, é necessário ter controle de dois modos de vibrar ortogonais. Para isso, utiliza-se um anel de atuadores piezelétricos como seguinte:

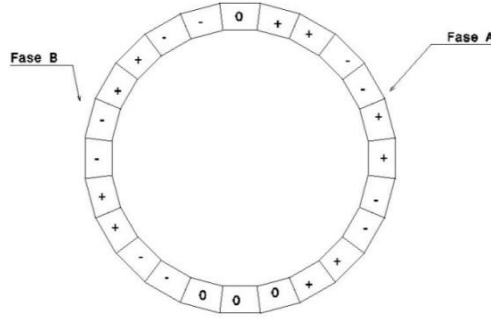


Figura 5: Anel piezelétrico

A fase A está alimentado com um sinal $C \sin(\omega t)$ e a fase B está alimentado por um sinal $C \cos(\omega t)$, e este anel está configurado a fim de gerar uma onda propagante no modo (0, 6) (seis larguras de onda no anel vibrante resultante da soma das ondas). Assim, tem-se uma onda propagante:

$$C \cos(6\theta) \cos(\omega t) + C \sin(6\theta) \sin(\omega t) = C \cos(6\theta - \omega t)$$

2.3 MEF Piezelétrico

O equacionamento do movimento de uma estrutura elástica incluindo atuadores piezelétricos pode ser derivado do principio de Hamilton. A equação piezelétrica na forma discreta pode ser expressa como [4]:

$$\begin{cases} [M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} - [P]\{\varphi\} = \{F\} \\ [P]^T\{u\} - [G]\{\varphi\} = \{Q\} \end{cases} \quad (4)$$

Onde:

[M] – matriz de massa

[C] – matriz de amortecimento

[K] – matriz de rigidez

[P] – matriz de acoplamento eletromecânico

[G] – matriz de capacitância

$\{u\}$ – vetor de movimento nodal

$\{\varphi\}$ – vetor de potencial elétrico nodal

$\{F\}$ – vetor da força externa nodal

$\{Q\}$ – vetor das cargas elétricas nodais

3. Modelagem Computacional

Esta seção tem por objetivo desenvolver um modelo computacional do estator do motor piezelétrico a fim de, primeiro, otimizar o estator de modo a gerar uma amplitude de onda alta para facilitar a transmissão de torque entre o estator e o rotor, e além disso encontrar a frequência ideal de utilização do motor. Para isso foi utilizado o software de elementos finitos Abaqus 6.10 de *Dassault Systèmes*, que pode realizar análise modal e harmônica com elementos piezelétricos.

3.1 Primeira modelagem

Em primeiro lugar, foi realizada uma modelagem simplificada do estator levando em conta apenas o anel que entra em contato com o rotor. O objetivo dessa modelagem é puramente educativo: saber usar o software de métodos de elementos finitos para modelar e visualizar corretamente o fenômeno envolvido no estator do motor piezelétrico. A grande vantagem de usar um modelo simples é a rapidez dos cálculos do software, permitindo vários testes sem ter que esperar muito tempo para visualizar o resultado.

Para essa modelagem, apenas o anel do estator e o anel de atuadores piezelétricos foram usados. Os materiais usados foram um alumínio para o anel do estator e o PZT-5A para os atuadores piezelétricos.

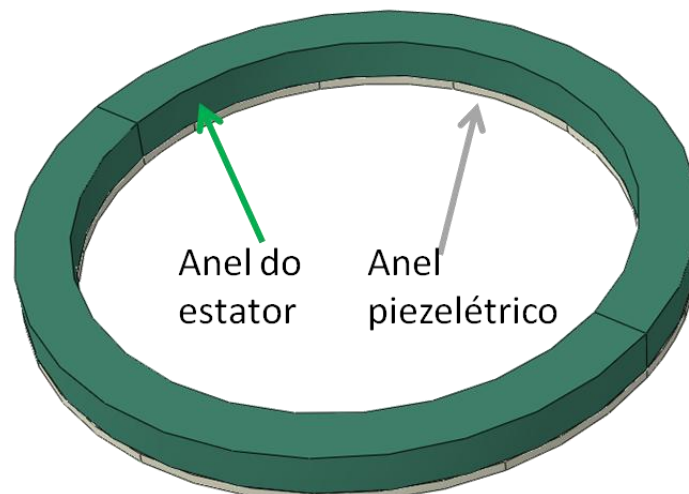


Figura 6: Modelo simplificado do estator

O anel piezelétrico foi modelado do mesmo modo que nos artigos [6][8]: duas fases A e B com atuadores de tamanho de 30° e uma polarização alternada, e um defasagem de 15° entre elas. Para as zonas de defasagem, usamos também atuadores piezelétricos como espaçadores, isso afim de não quebrar a simetria do anel e conservar os modos de vibrar de um anel normal.

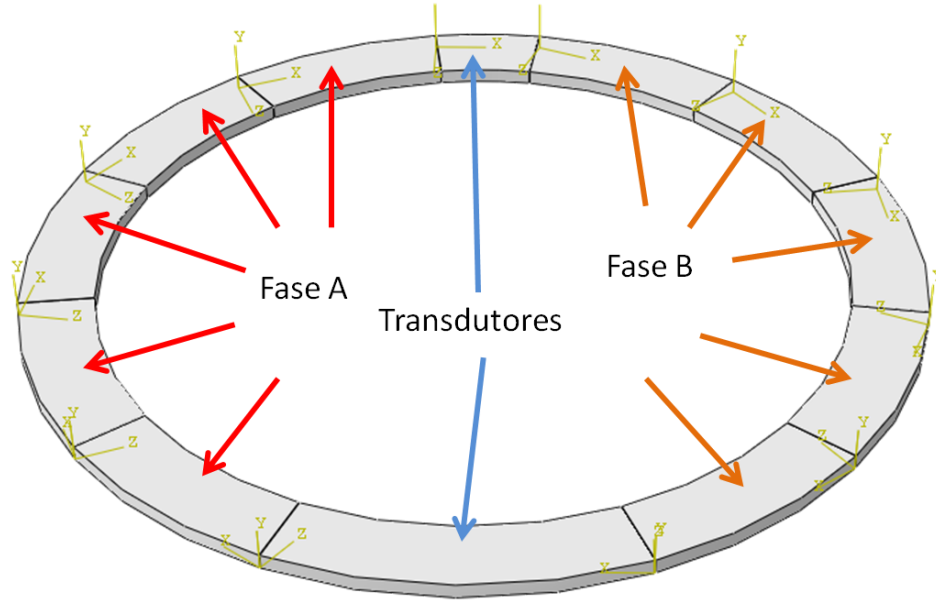


Figura 7: Modelo do anel piezelétrico

O diâmetro externo é de 60 mm e o diâmetro interno é de 50mm.

As propriedades do material do anel de alumínio são: um módulo de Young $E=70$ Gpa, um coeficiente de Poisson $\nu=0,35$ e uma densidade $\rho=2700$ kg/m³. Também, para as análises harmônicas, foi usado um amortecimento de Rayleigh de $\alpha = 0,1$, que foi escolhido arbitrariamente (dentro de uma faixa de valores comumente utilizados pelo alumínio). As propriedades do material piezelétrico PZT-5A são as seguintes:

- *Acoplamento piezelétrico:*

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 584 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 584 & 0 & 0 \\ -171 & -171 & 374 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * 10^{-12} \text{ C/N}$$

- *Permeabilidade relativa:*

$$\frac{\epsilon_T}{\epsilon_0} = \begin{bmatrix} 1730 & 0 & 0 \\ 0 & 1730 & 0 \\ 0 & 0 & 1700 \end{bmatrix}, \epsilon_0 = 8,854 * 10^{-12} \text{ F/m}$$

- *Propriedades mecânicas:*

Tabela 2: Propriedades mecânicas das cerâmicas

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
60,61	48,31	60,61	0,512	0,289	0,408	23,0	23,5	23,0

- $C^E = S^{E-1}$ (5)

- $e = d \cdot S^{E-1}$ (6)

- $\epsilon^S = \epsilon^T - d \cdot S^{E-1} \cdot d^t$ (7)

Essas propriedades serão usadas para todo o estudo. Estes dados foram encontrados numa forma diferente que foi apresentada na seção 2.1, mas existe formulas de conversão (equações 5, 6, 7).

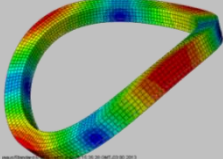
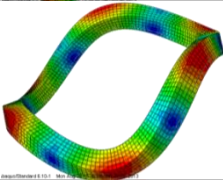
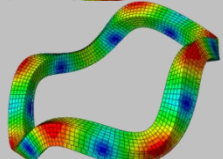
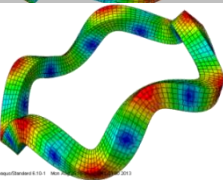
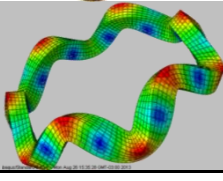
A primeira etapa será o estudo desse anel, que foi dimensionado do mesmo modo que o artigo [8], e depois o mesmo estudo será realizado para cada mudança dos parâmetros do anel (espessura do anel e dos atuadores piezelétrico, dentes, etc). No final, uma comparação permitirá escolher o melhor anel do estator do motor.

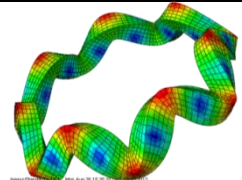
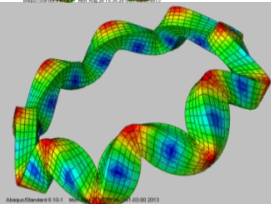
Para todo o estudo com *Abaqus*, o tipo de elemento utilizado para o anel metálica foi o elemento C3D8R, um tijolo linear com 8 nós, e para as cerâmicas piezelétricas foi utilizado o elemento C3D8E, um tijolo linear piezelétrico com 8 nós.

3.2 Análise modal

Primeiramente, deve-se realizar uma análise modal, de modo a escolher e observar a frequência do modo de vibrar desejado no estator. Aqui, utiliza-se uma modelagem simplificada, e essas frequências não são representativas do resultado final, mas serão utilizadas depois para a análise harmônica. A análise modal é realizada com o anel piezelétrico colado ao anel (na notação (i, j) do modo de vibrar, i corresponde ao número de nós na direção radial e j o número de nós na direção circunferencial) e os resultados são descritos na tabela 2.

Tabela 3: Modos de vibrar do conjunto anel/piezo

Modo	Frequência	Imagem
(0, 2)	3109 Hz	
(0, 3)	8711 Hz	
(0, 4)	16253 Hz	
(0, 5)	25342 Hz	
(0, 6)	35635 Hz	

(0, 7)	46824 Hz	
(0, 8)	56150 Hz	

3.3 Análise harmônica

A análise harmônica permite achar a frequência de operação teórica do motor para atingir o modo vibratório do anel, e também fazer uma comparação entre cada mudança dos parâmetros do anel do estator. O principal fator a se considerar para a comparação é o deslocamento máximo do anel: um deslocamento elevado facilitará o contato entre o rotor e o estator do motor, e, portanto uma melhor ligação entre eles.

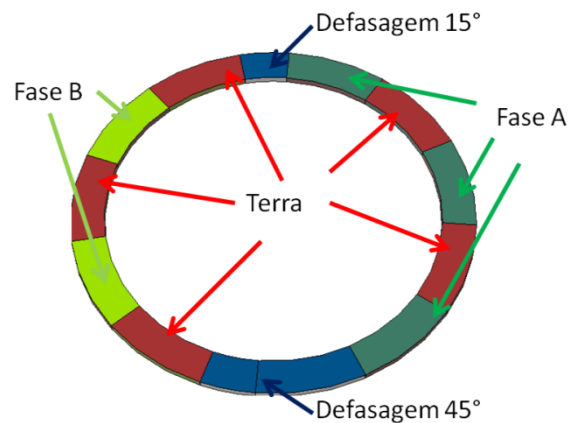


Figura 8: Anel piezelétrico

Para a primeira análise harmônica, usamos o modo (0, 6) que foi usado também no artigo de referência [14]. A fim de ativar o modo (0, 6), que tem uma largura de onda na circunferência de $\lambda_c = 2\pi/6 = \pi/3$ ou seja, 60° , foram utilizados cinco atuadores por fase, uma fase A que tem uma tensão senoidal de 50 V e fase B tem uma tensão senoidal complexa de $50i$ V (ou seja, uma defasagem de 90° com a fase A). Os atuadores de defasagem estão em curto. Portanto, o anel piezelétrico foi modelado como mostrado na figura 8.

Cada atuador piezelétrico tem um tamanho de 30° na circunferência do anel, e as duas fases estão em defasagem de $\lambda/4$, ou seja, 15° . Nessa modelagem, o anel é um único corpo,

mas na prática, não teria ligação física entre cada um dos atuadores. Deve-se lembrar que essa é uma modelagem simplificada, o impacto de não haver um anel completamente rígido será tratado mais tarde neste relatório.

A análise harmônica é realizada no *Abaqus*, usando o *step* de perturbação linear *steady-state dynamics, direct*. Uma primeira análise é realizada com uma grande faixa de frequência de excitação, centrada no valor de frequência encontrado na análise modal (aqui para o modo (0, 6), 35635 Hz). O resultado dessa análise mostra que, como previsto por vários artigos, a frequência de excitação para obter o maior deslocamento fica um pouco mais alta, aqui por volta de 35810 Hz, ou seja, uma diferença de 4,9% com o valor da análise modal. Essa diferença é principalmente devida pelo amortecimento adicionado na análise harmônica.

Uma segunda análise é realizada com uma pequena faixa de frequência, centrada na frequência de 35810 Hz. O primeiro resultado que podemos observar é a plotagem do deslocamento em função da frequência de excitação descrita na figura 9.

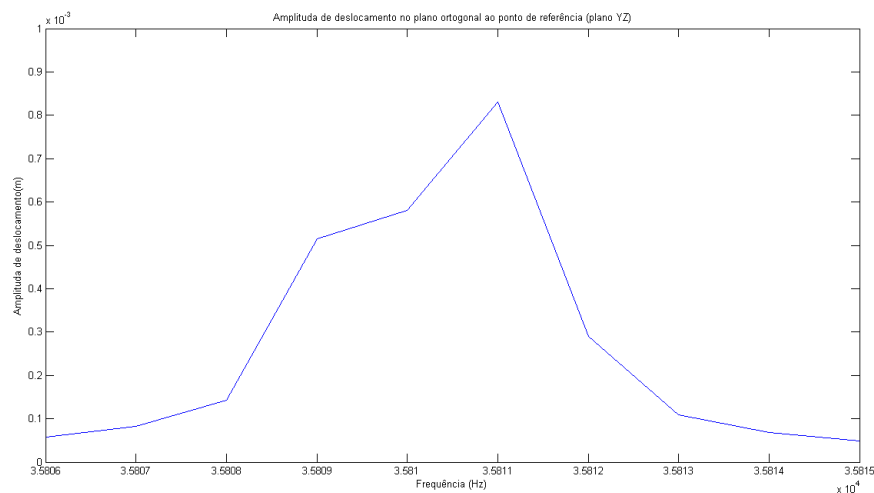


Figura 9: Curva deslocamento em função da frequência de excitação

Aqui o valor do deslocamento não é representativo do valor real, devido à utilização de um valor de amortecimento arbitrário. Mas esse valor pode ser usado para um estudo comparativo entre as diferentes modelagens do anel. Então neste caso, temos um pico de 0,831mm para uma frequência de 35811 Hz.

Um outro resultado interessante é a animação no *Abaqus*, mostrando a forma da onda progressiva no anel. Outro modo de visualizar a forma da onda é pelas curvas de *Lissajous* (figura 10) para um nó sobre a borda externa, onde há o maior deslocamento. Para isso, precisa-se obter o deslocamento de um nó para vários valores no tempo, operação que o *Abaqus* não faz automaticamente. Mas esse problema pode ser simplesmente resolvido usando um script Python que recupera os valores complexos para cada frequência no *Abaqus*, e depois usa esses valores em um script Matlab para plotar as curvas de *Lissajous*. Esses dois scripts estão disponíveis no [anexo 1](#).

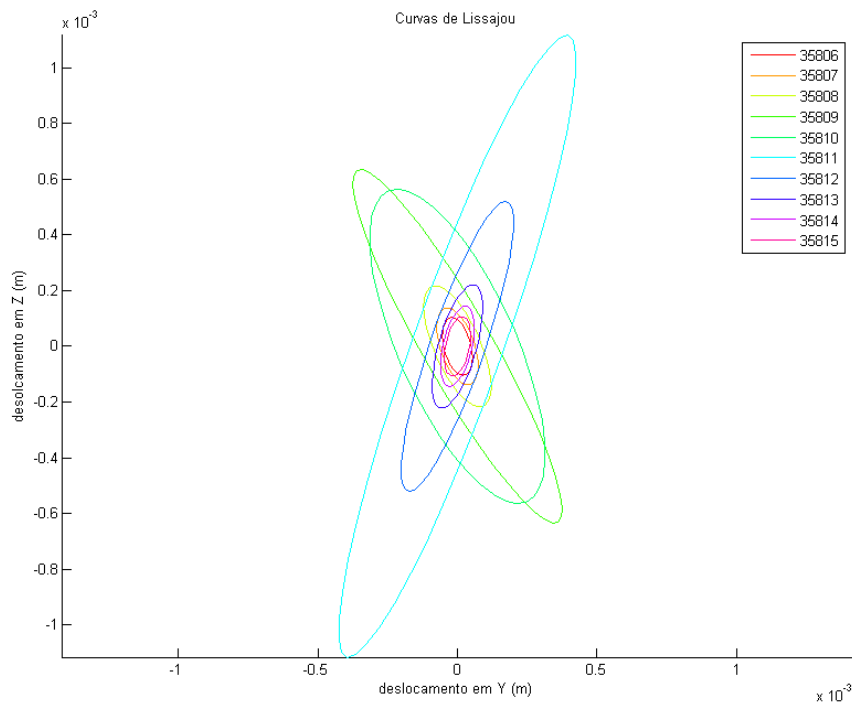


Figura 10: Curvas de Lissajous

Observações:

- Podemos ver que os deslocamentos em Y e Z (no plano ortogonal ao ponto de referência) formam uma elipse e não um círculo.
- Esses valores de deslocamentos são qualitativos, pois esta é uma modelagem simplificada e o valor do amortecimento é arbitrário.
- Existe uma grande variação de deslocamento para um pequeno passo de frequência, mas isso na prática pode variar, dependendo do valor do amortecimento.

3.4 Escolha do material

Um primeiro estudo comparativo pode ser realizado sobre o material do estator. Assim, uma análise harmônica foi realizada para cada um dos materiais e foi comparado o deslocamento máximo do estator no modo (0, 6) com os materiais comuns seguintes: alumínio, aço e bronze (CuZn37). Os resultados estão apresentados na tabela 3 seguinte. Para todos foi usado um amortecimento de Rayleigh de $\alpha = 0,1$.

Tabela 4: Comparação dos materiais

Material	E (Módulo de Young) (GPa)	Densidade (kg/m ³)	Amplitude de deslocamento em YZ (mm)	Raio de deslocamento em Y (mm)	Frequência de utilização (Hz)
Alumínio	70	2700	0,831	0,393	35810
Aço	210	7800	0,833	0,332	37679
CuZn37	117	8550	0,519	0,314	29211

Uma primeira observação é que o alumínio é o melhor material, tendo a maior amplitude de deslocamento, e, portanto uma melhor eficiência. Um bom modo visual de comparar esses três materiais é plotando-se as curvas de *Lissajous* nas frequências de amplitude máxima para cada um como descrito na figura 11.

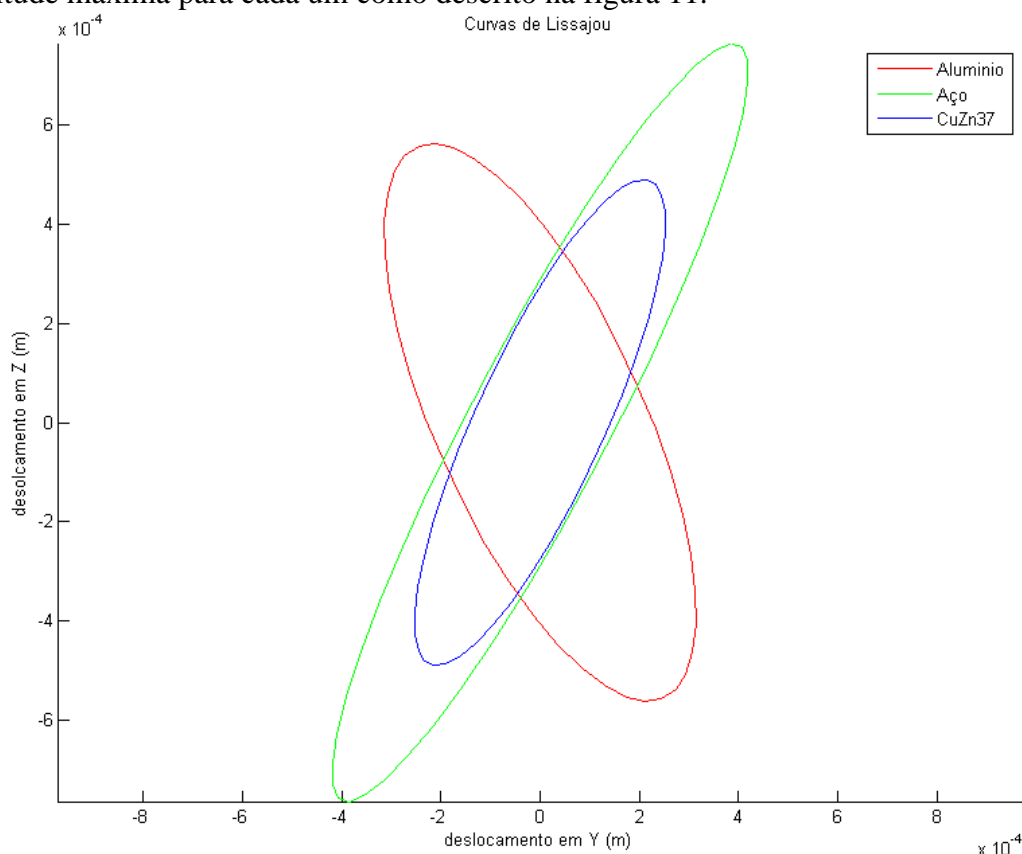


Figura 11: Curvas de Lissajou para os diferentes materiais

Pode-se observar que o melhor material ainda é o alumínio, que possui a melhor elipse com um maior raio em Y e Z. Para todos os estudos seguintes será utilizado alumínio.

3.5 Escolha da espessura do anel piezelétrico

Existem duas espessuras de atuadores piezelétricos disponíveis, 0,4 mm e 1 mm. Todos os resultados anteriores foram obtidos com um anel piezelétrico de 1 mm de espessura. Da mesma forma, uma análise modal foi realizada e os resultados foram comparados.

Tabela 5: Comparação das espessuras do anel piezelétrico

Espessura do anel piezelétrico (mm)	Amplitude de deslocamento em YZ (mm)	Raio de deslocamento em Y (mm)	Frequência de utilização (Hz)
1,0	0,831	0,393	35810
0,4	1,674	1,2	36034

Pode-se observar que uma espessura de 0,4 mm oferece resultados bem melhores que aqueles obtidos com uma espessura de 1 mm, como mostra as curvas de *Lissajous* como descrito na figura 12.

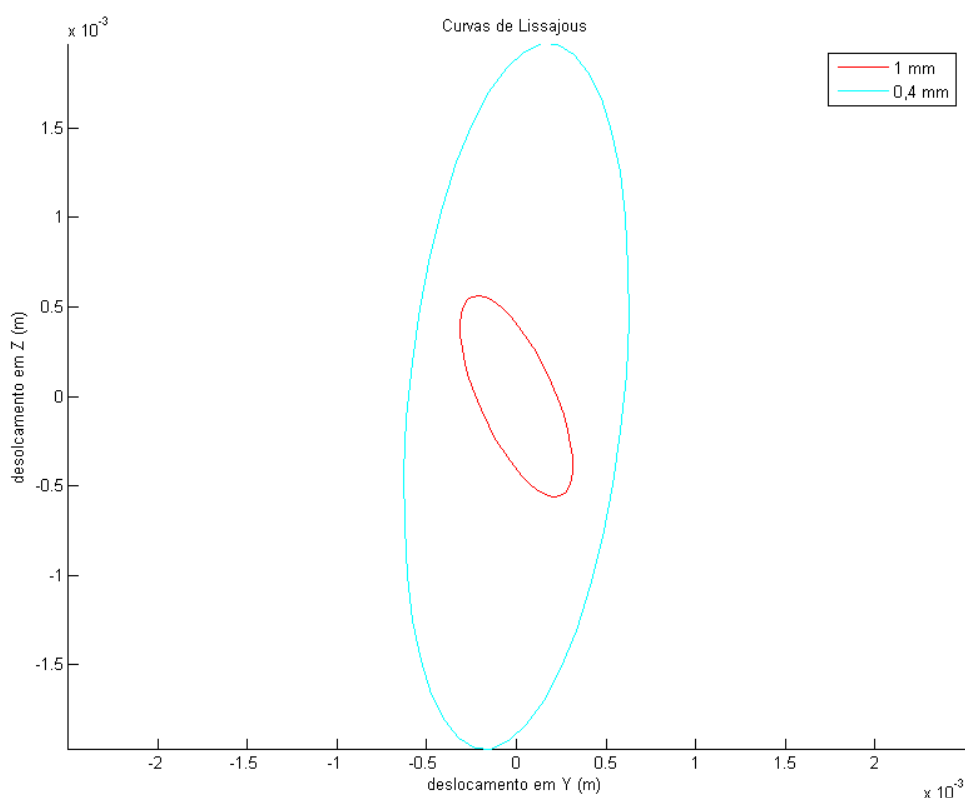


Figura 12: Curvas de Lissajous para os diferentes valores da espessura do anel piezelétrico

Com essa espessura, o estator apresenta um deslocamento e uma frequência de utilização mais elevada, portanto uma velocidade também mais elevada. A partir daqui, o anel piezelétrico terá uma espessura de 0,4 mm.

3.6 Escolha da espessura do anel vibrante

O objetivo aqui é de determinar qual é a melhor espessura do anel vibrante a fim de obter um deslocamento ótimo.

Tabela 6: Comparação das espessuras do anel vibrante

Espessura do anel (mm)	Amplitude de deslocamento em YZ (mm)	Frequência de utilização (Hz)
3	1,811	28350
3,5	1,773	32599
3,75	1,757	34384
4	1,719	36096
4,5	1,182	39505

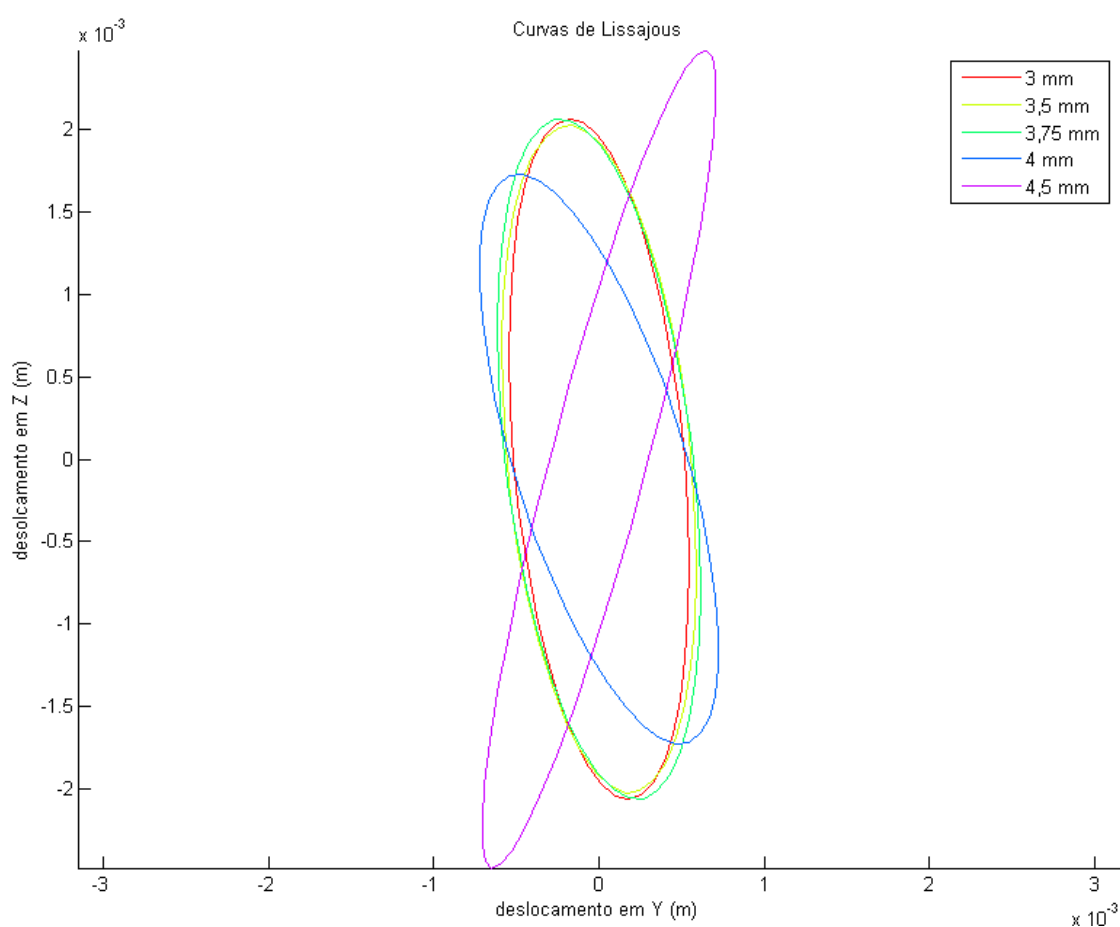


Figura 13: Curvas de Lissajous para diferentes valores de espessura do anel

Como pode-se observar na figura 13, para uma espessura menor que 3,75 mm, a amplitude cresce pouco, mas a frequência diminui quase que linearmente, então a espessura ótima é 3,75 mm, sendo que a onda progressiva tem a velocidade mais elevada.

3.7 Escolha do número de dentes do estator

Outra parte importante é o número de dentes do estator, que vai permitir amplificar os deslocamentos, e, portanto a eficácia do motor, com um impacto limitado nos outros parâmetros do estator (frequência de operação e deslocamento máximo do anel).

Aqui foi realizado uma comparação entre três números de dentes de 2 mm de altura, 60, 75, 90 (ver figura 14).

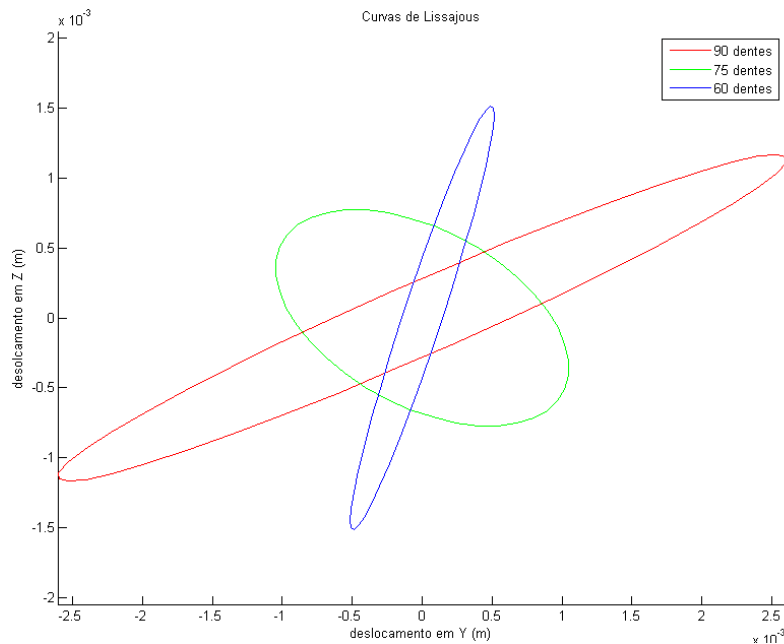


Figura 14: Curvas de Lissajous para 90, 75 e 60 dentes

Pode-se observar que a curva para 75 dentes é a mais circular, e, portanto é a mais adaptada para o estator. Na figura 15 é apresentada a deformação do anel vibrante com os dentes.

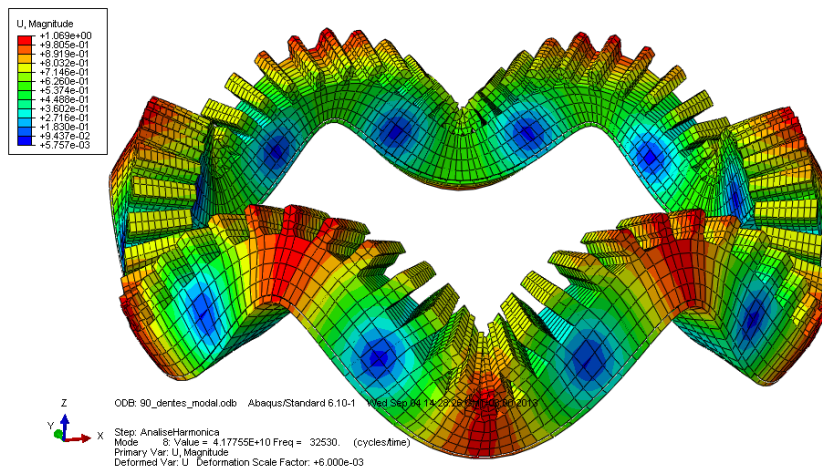


Figura 15: Deformação do anel vibrante

4. CAD

4.1 CAD do estator

O modelo CAD do estator foi realizado de acordo como o estudo anterior: o anel tem uma espessura de 3,75 mm, uma diâmetro externo de 60 mm e um interno de 50 mm e 75 dentes de 2 mm de espessura. Uma placa de 1 mm de espessura permite a ligação entre o anel vibrante e a fixação do estator, que é realizada por 4 parafusos M3.

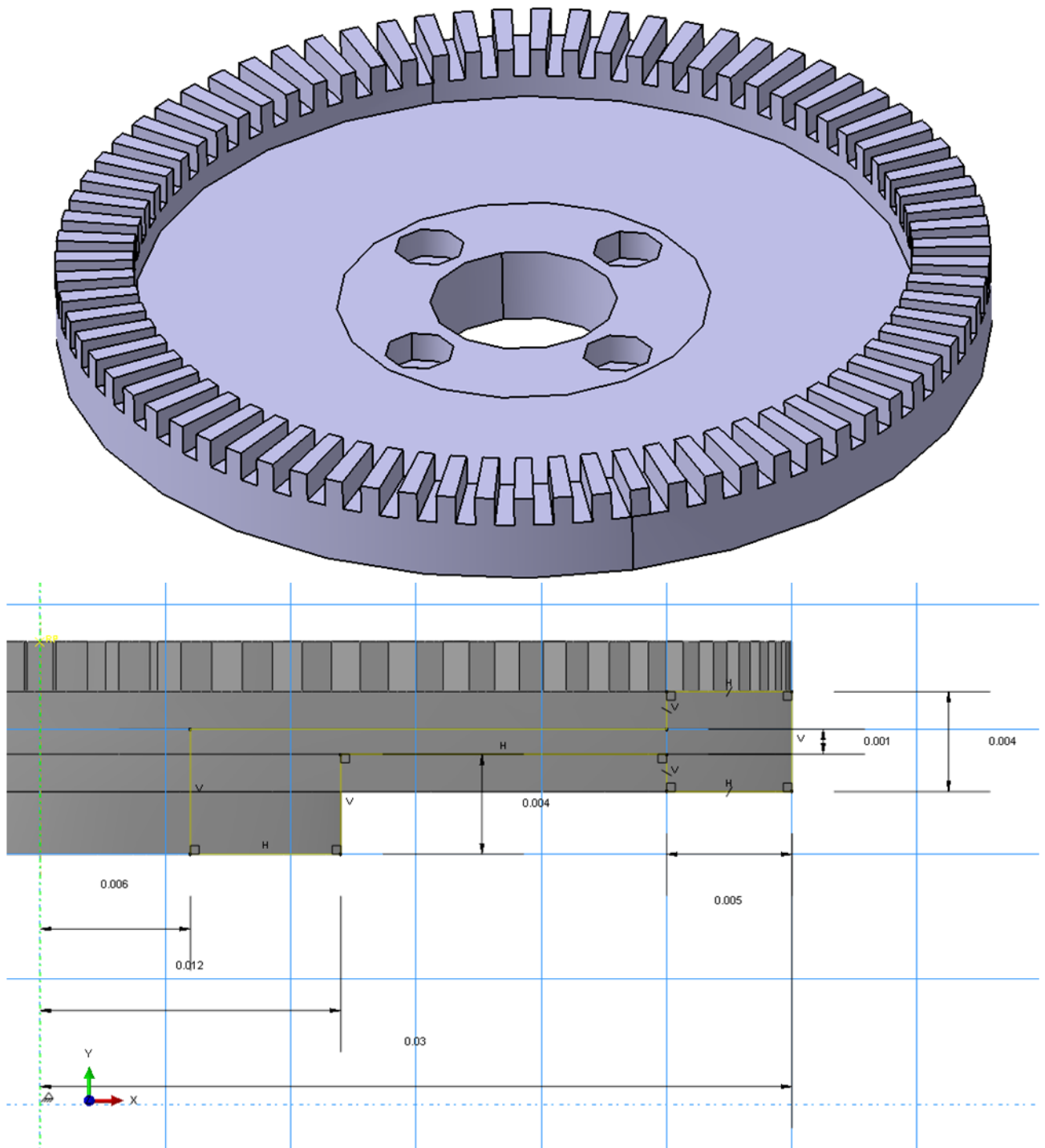


Figura 16: CAD do estator

Afim de verificar se uma placa de 1 mm basta para sustentar o anel, uma análise estática foi realizada com uma força de 200 N na direção do eixo (para simular um peso de 20 kg, ver figura 16).

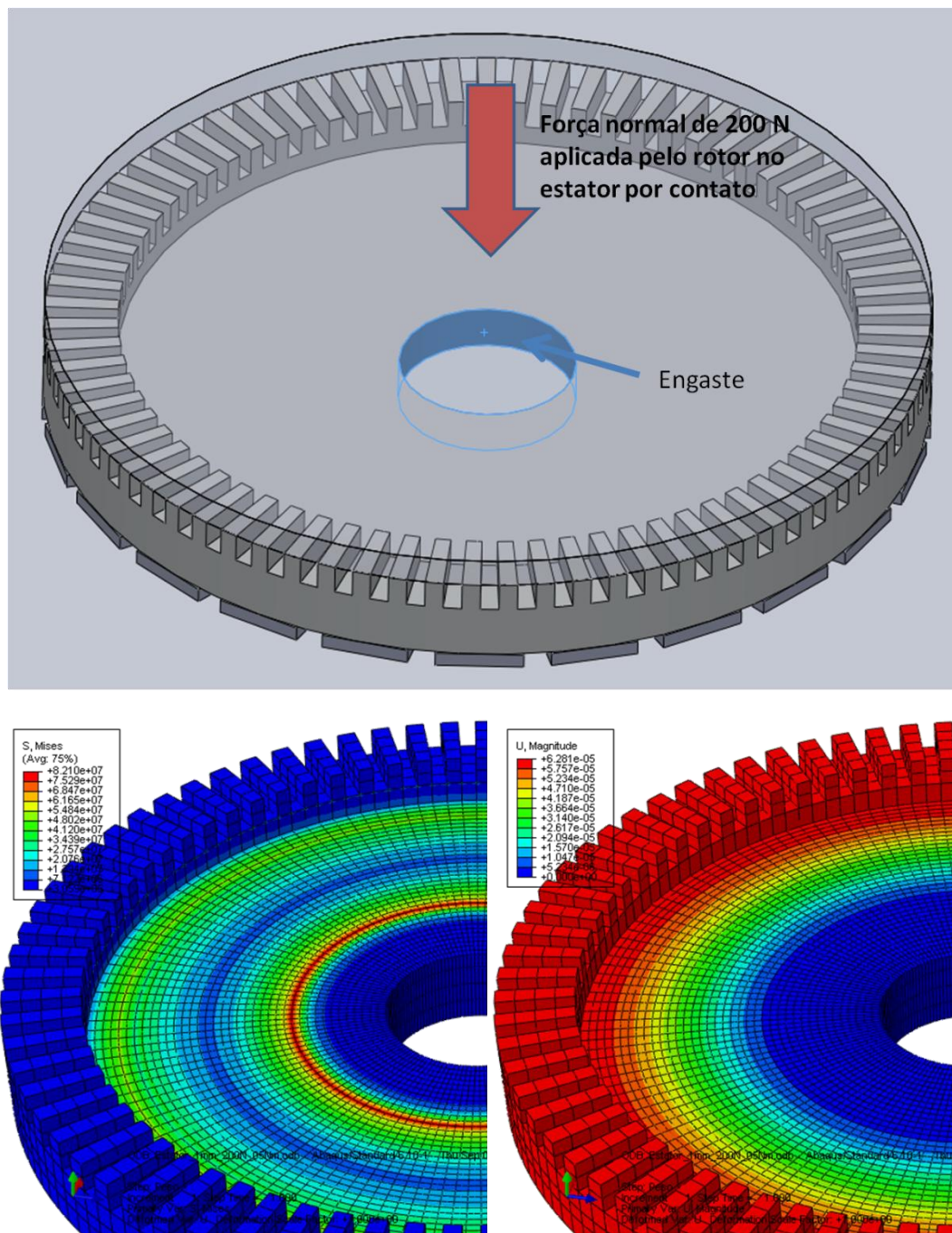


Figura 17: Análise estática do estator com uma força de 200N

A tensão de von Mises máxima é de 82,1 MPa, que é inferior á tensão de escoamento mínima de uma liga metálica de alumínio (200 MPa), e a amplitude de deslocamento máxima é de 62,8 μm , que não atrapalha o mecanismo.

Uma outra análise foi realizada com um torque de 0,5 N.m como descrito na figura 17.

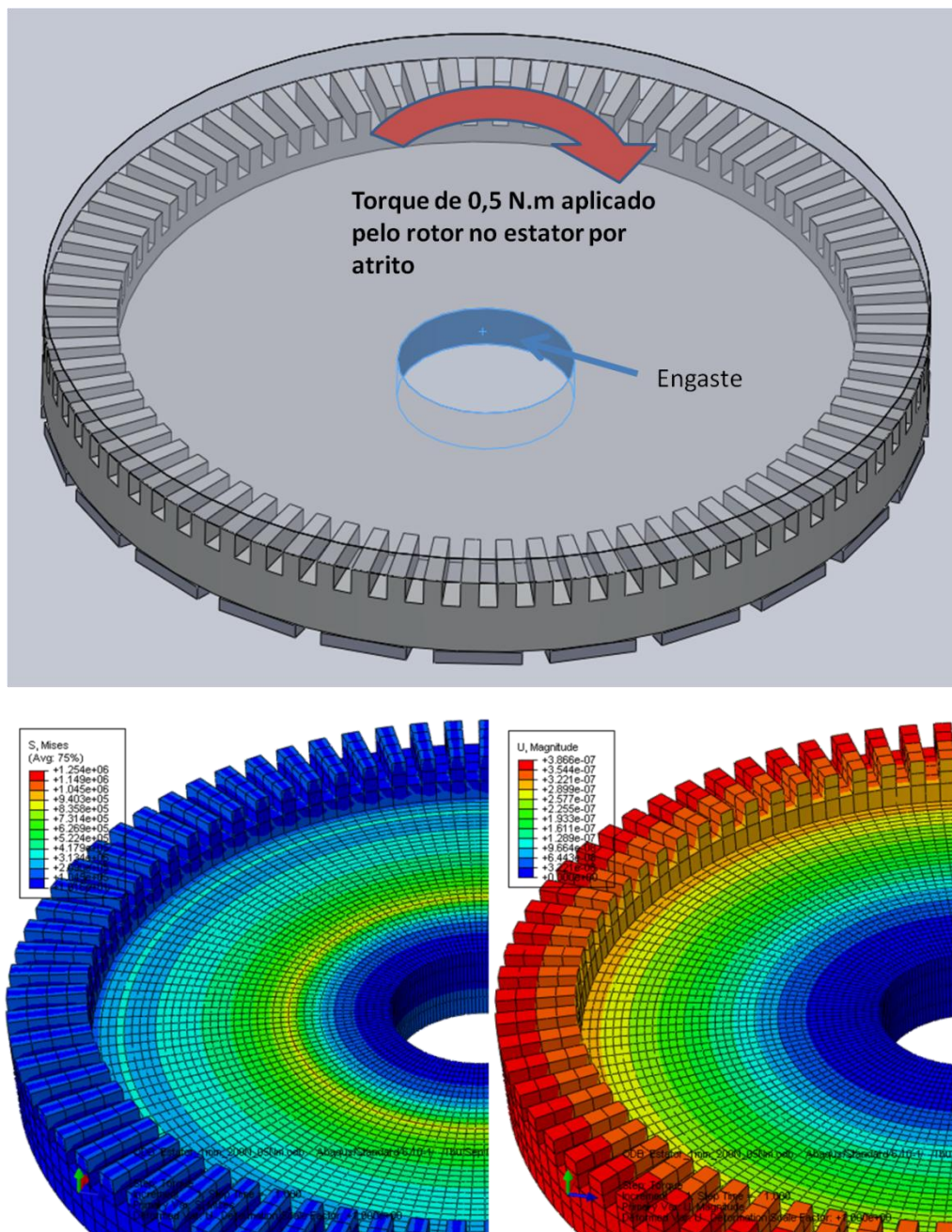


Figura 18: Análise estática do estator com um torque de 0,5 N.m

A Tensão de von Mises máxima é de 1,3 MPa e a amplitude de deslocamento máxima é de 0,4 μm , então o estator sustenta sem problema um torque de 0,5 N.m. Esses valores (200 N e 0,5 N.m) foram adaptados de uma ficha técnica de um motor piezelétrico de um tamanho similar.

4.2 Mecanismo do motor

Existem vários mecanismos possíveis para fabricar um motor piezelétrico.

4.2.1 Primeira solução

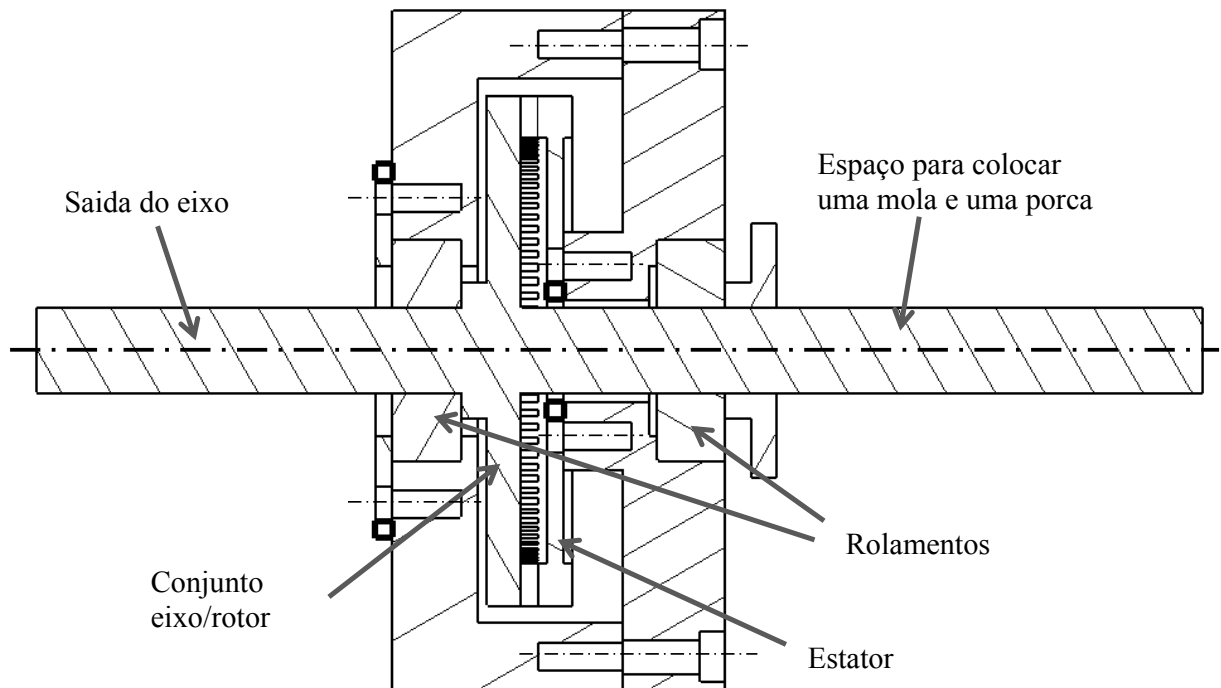


Figura 19: Primeira solução de mecanismo

Vantagens:

- Simplicidade de fabricação e montagem,
- Possibilidade de ajustar a força da mola com a porca,
- A caixa principal é a mais fina possível.

Desvantagens:

- O espaço no eixo para colocar a mola aumenta muito o tamanho do motor,
- Como o rotor e o eixo são uma única peça, uma força na direção do eixo pode atrapalhar o contato entre o rotor e o estator.

A última desvantagem torna essa solução não viável.

4.2.2 Segunda solução

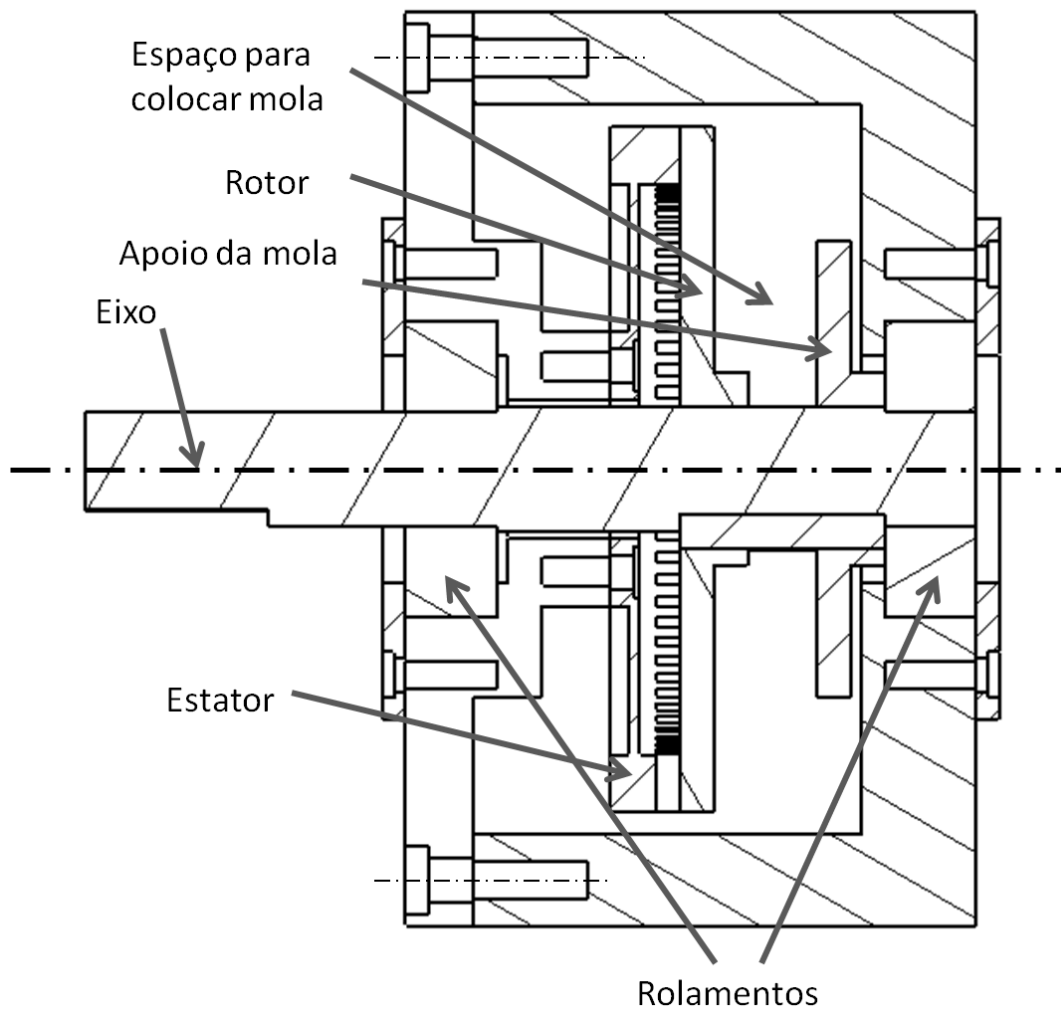


Figura 20: Segunda solução de mecanismo

Vantagens:

- Tamanho global melhor que a solução anterior,
- O rotor é independente do eixo, resolvendo o problema da solução anterior.

Desvantagens:

- Força da mola não ajustável,
- Fabricação mais complexa que a solução anterior.

Essa solução com o rotor independente do eixo permite forças normais no eixo sem atrapalhar o funcionamento do motor. Portanto, essa solução é ótima e será escolhida para a fabricação do protótipo. Os desenhos de fabricação estão disponíveis no anexo 2.

4.3 Anel piezelétrico

O anel piezelétrico é a parte a mais importante do motor: se ele está mal fabricado, a onda progressiva pode ter uma amplitude baixa ou simplesmente não acontecer.

4.3.1 CAD do anel piezelétrico

A cerâmica piezelétrica pode ser cortada somente com uma máquina de corte linear, então é tecnicamente impossível fabricar um anel perfeito. A solução adotada aqui é cortar 24 pedaços de cerâmica de modo a se obter uma geometria muito próxima a de um anel. Como o estator funciona no modo de vibrar (0, 6), cada fase tem 5 atuadores com tamanho de 30° , e as partes de cerâmica para criar a defasagem têm 15° e 45° , então o anel final vai ser constituído de 24 pedaços de cerâmica de 15° cada um. No CAD, foi considerado também a precisão da máquina, que é de $\pm 0,01$ mm e que se traduz em um ângulo de $14,95^\circ$ (considerando que deve-se cortar com essa precisão ambos os lados da cerâmica).

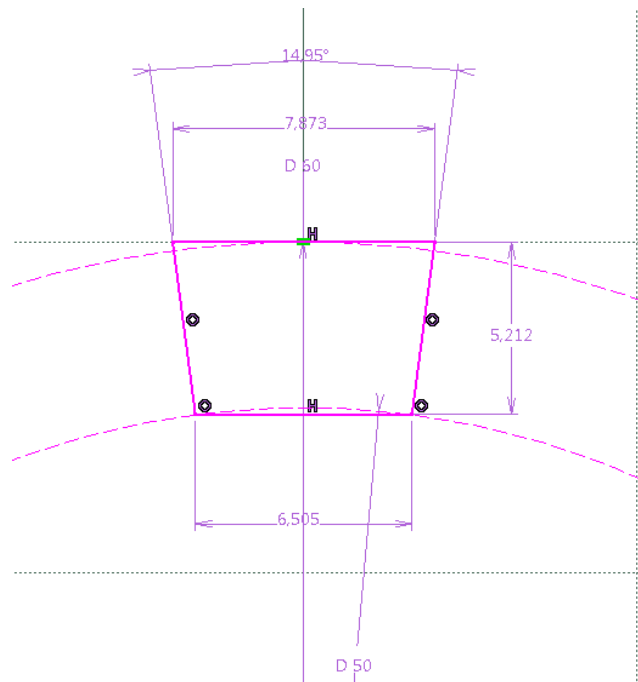


Figura 21: CAD de um pedaço de cerâmica

4.3.2 Colagem do anel piezelétrico no estator

Na hora de fabricar o anel piezelétrico, as cerâmicas de PZT-5A não estavam disponíveis, e então foi usado uma cerâmica PZT-4SW de 1 mm de espessura, que foi usinado até chegar a 0,5 mm de espessura. Portanto, uma comparação entre os resultados experimentais e a

modelagem computacional não tem sentido. A fim de colar as cerâmicas no anel vibrante do estator de um jeito preciso, essas cerâmicas foram, primeiramente, coladas com adesivo dupla face num gabarito de papel, e depois coladas no estator usando epóxi condutivo. Durante esse processo, o epóxi pode se infiltrar entre as cerâmicas, ou nas bordas exteriores das cerâmicas, e formar um curto-circuito. Para resolver esse problema, as cerâmicas foram um pouco subdimensionadas a fim de poder passar um estilete entre as cerâmicas para tirar o epóxi infiltrado. Fazendo isso, reduz-se a eficiência desse anel piezelétrico, mas os problemas de curto circuito eram tão grandes que foi necessário.

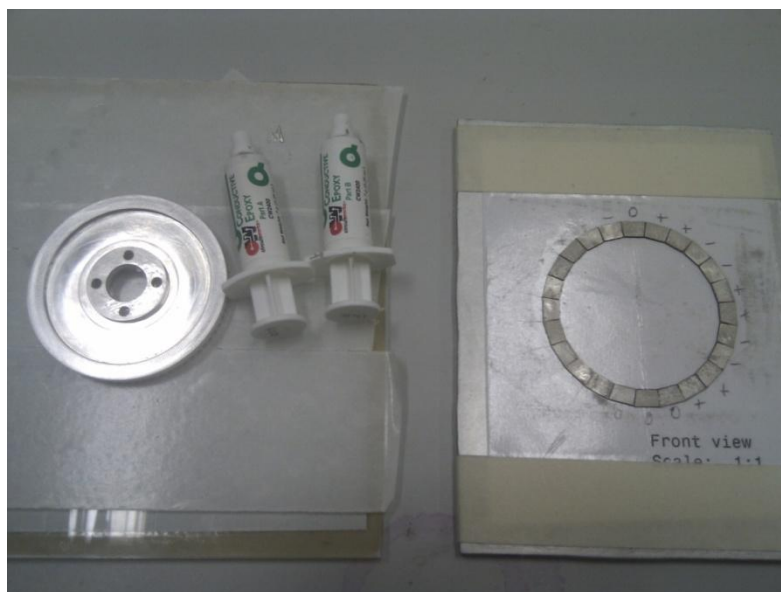


Figura 22: Colagem das cerâmicas no estator



Figura 23: Conjunto anel piezelétrico e estator

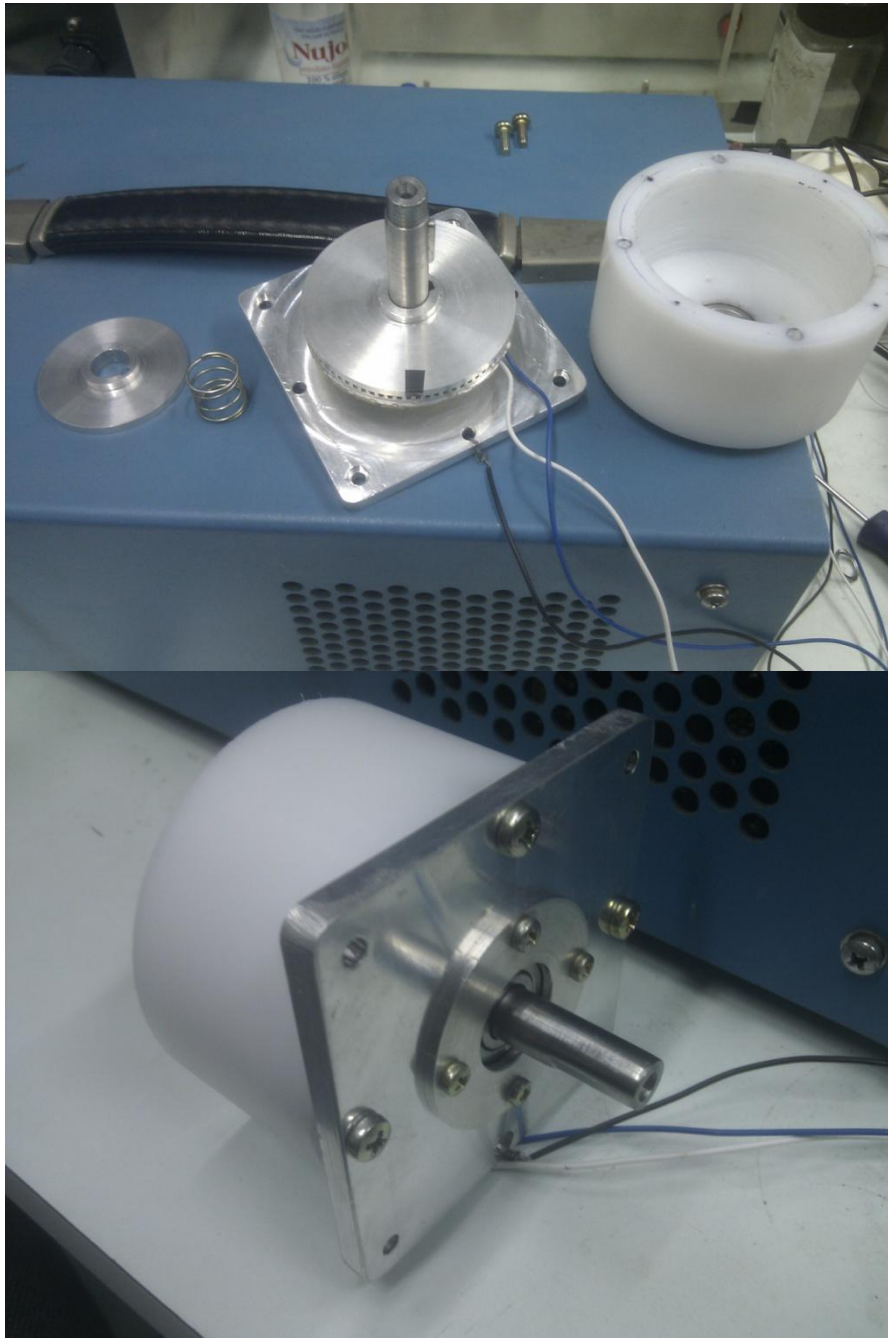


Figura 24: Motor aberto (cima), Motor fechado (baixo)

5. Resultados experimentais

5.1 Configuração

Para todos os testes experimentais, foi utilizado:

- Um gerador de funções, com duas saídas e a possibilidade de induzir uma defasagem entre elas,
- Dois amplificadores de alta frequência *AR Worldwide Model 8000A3*, de 10 kHz até 10 MHz,

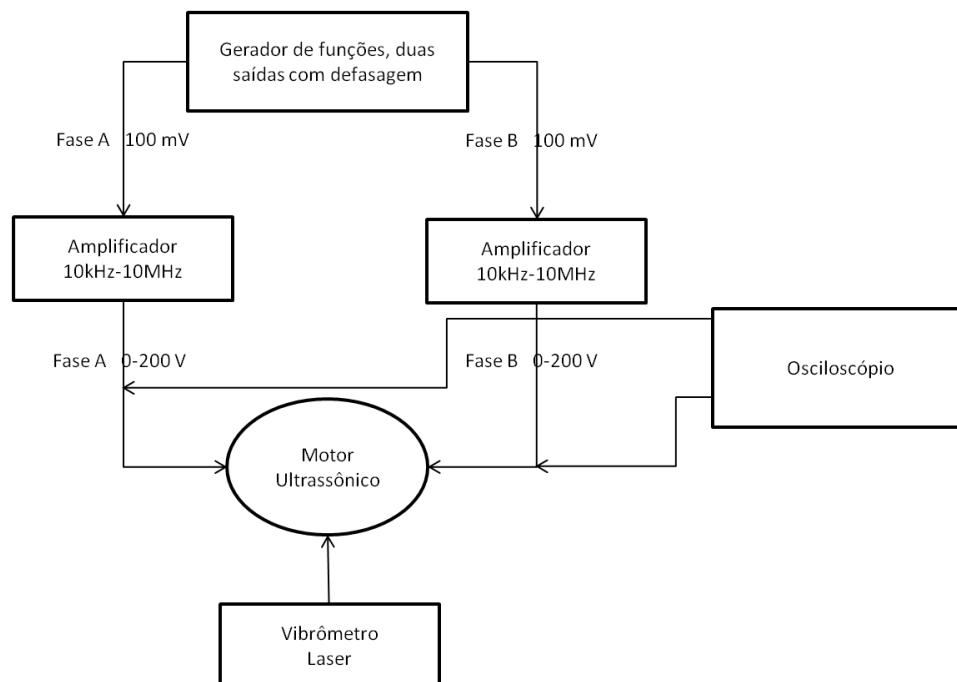


Figura 25: Alimentação do motor

5.2 Frequência e amplitude de ressonância

Em primeiro teste foi realizado uma busca da frequência de funcionamento do motor. Para isso, as duas fases foram ligadas na mesma fonte, a fim de poder achar mais facilmente a frequência de ressonância do conjunto estator e anel piezelétrico, e foi utilizado um vibrômetro laser da marca *polytec*, modelo *OFV-5000*. A frequência de funcionamento do motor pode ser facilmente diferenciada das outras, sendo ela tem a maior amplitude de todos os outros modos de vibrar do estator, e também a análise computacional situa ela próxima dos 31 kHz. Uma vez que essa frequência é encontrada, é levantada uma curva do deslocamento (normal) em função da frequência de excitação, apresentada na figura 24.

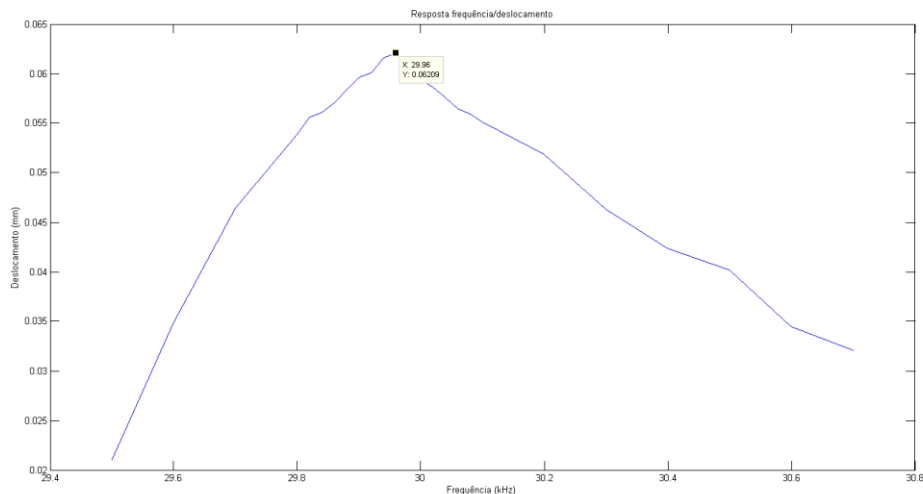


Figura 26: Deslocamento maximo em função da frequência

Essas medidas foram realizadas com o estator livre, sem o rotor e a mola, e com uma tensão de senoidal de amplitude de 50 V. A frequência de ressonância é atingida para 29960 Hz, e oferece um deslocamento normal máximo de 62,1 μm (em um ponto perto da circunferência exterior do estator, em cima de um dente).

5.3 Medida de impedância

Um jeito rápido e eficiente de encontrar a frequência de ressonância do conjunto estator/atuadores piezelétricos é a medida da impedância. Ao chegar à frequência de ressonância do modo de vibrar desejado para a movimentação do motor, a impedância das cerâmicas vai cair, devido ao modo de vibrar que facilita as deformações das cerâmicas.

Portanto, fazendo uma análise de impedância das fases do estator, foi achada a frequência de funcionamento do motor. Aqui foi utilizado um Agilent 4294A *impedance analyser*, e foi medida a condutância de cada fase e depois das duas fases juntas, com um estator livre (sem o rotor):

Tabela 7: Condutância do estator

Fase	Frequência (Hz)	Condutância (uS)
A (azul)	30057	30,71
B (branca)	29957	66,65
A & B	29957	101,2

Observações:

- A frequência de ressonância da fase A tem uma frequência diferente de 0,3% em comparação á fase B. Isso ocorre devido a erros de montagem, mas sendo essa diferença muita pequena, o impacto dela sobre o funcionamento do motor é limitado.

- A frequência de ressonância das duas fases é quase igual á frequência encontrada com o vibrômetro laser.
- Podemos ver que a condutância da fase B fica muito mais elevada que da fase A. A fase A tinha uma cerâmica quebrada e também duas cerâmicas provavelmente queimadas, que pode explicar essa diferença alta de condutância.

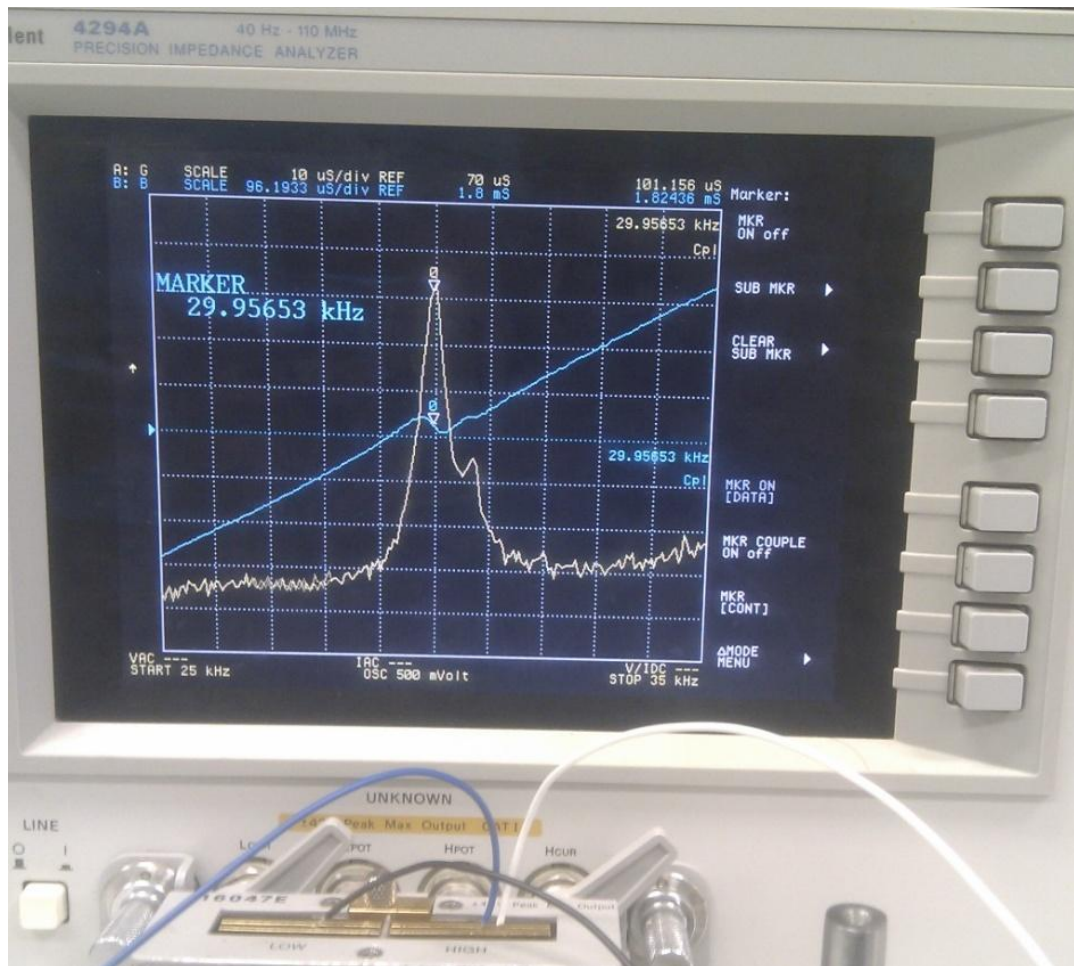


Figura 27: Leitura da condutância do impedômetro

5.4 Testes com o rotor livre

Os primeiros testes realizados foram com apenas o rotor em contato com o estator, sem a mola e sem engrenar o eixo, como mostrado na figura 26.

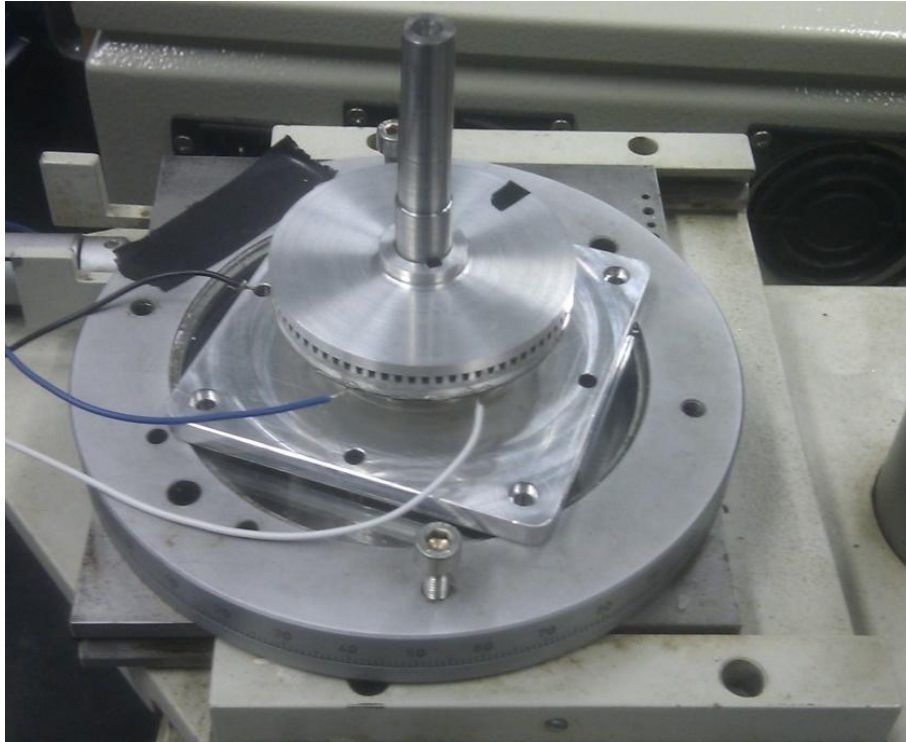


Figura 28: Motor aberto

Essa configuração tem várias vantagens: sendo o rotor muito leve, a frequência de ressonância do estator vai ficar muito perto daquela quando o estator está livre, e é muito fácil de observar a influencia dos parâmetros (tensão, frequência, defasagem) em relação à rotação do rotor. Nessa configuração, o rotor tem uma rotação ótima para uma frequência de 29960 Hz e um defasagem de fase de 90° . Pode-se observar:

- Os amplificadores induzem uma defasagem, então o valor dado pelo gerador de função não é o valor real de defasagem na entrada no motor, e, portanto para visualizar corretamente a defasagem entre as duas fases deve-se colocar um osciloscópio nas saídas dos amplificadores,
- O motor é muito barulhento, devido ao atrito entre os dentes e a superfície do rotor, e ao fato que o rotor esta livre de vibrar (não tem a mola),
- O motor funciona para uma grande faixa de defasagem (entre $\pm 50^\circ$ até $\pm 120^\circ$),
- Pode-se observar que, para efetuar uma inversão de rotação, basta adicionar 180° de defasagem entre as fases,
- Os dentes e a superfície de contato devem ser muito limpos, esse fator influencia bastante a regularidade da rotação (se for sujo, o rotor vai ter uma rotação que vai alternar entre baixa e alta velocidade),
- Para uma tensão de uma amplitude superior a 70 V, o estator começa a esquentar e a perder em velocidade, e para uma amplitude superior a 75 V o epóxi começa a esquentar muito,

Uma curva de velocidade em função da amplitude da tensão foi também realizada para três configurações (rotor livre, rotor com uma massa de 120g, e rotor com uma massa de 550g):

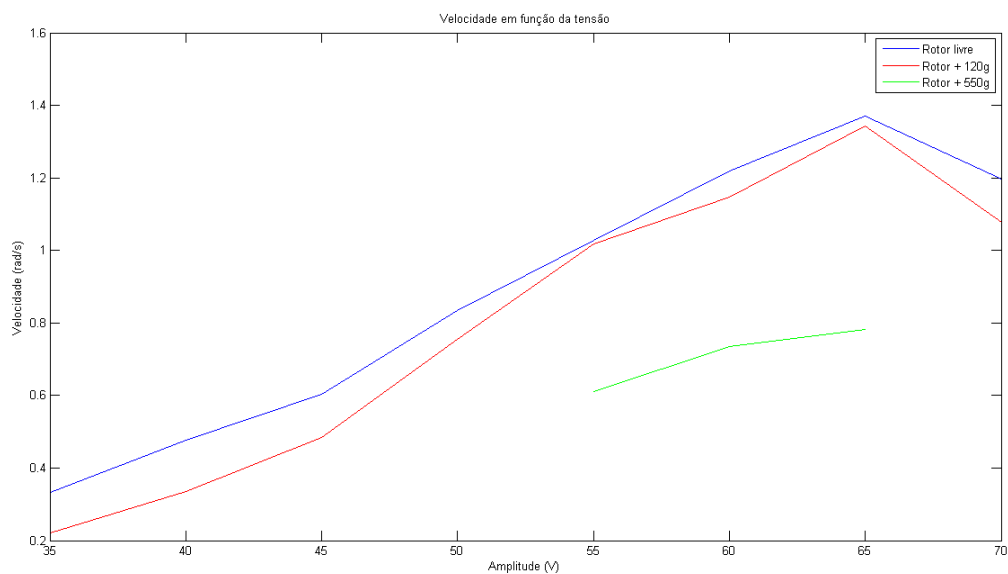


Figura 29: Rotação em função da tensão de alimentação

Para as três configurações, a velocidade máxima está atingida para uma tensão de amplitude de 65 V. Para o rotor livre, essa velocidade máxima é de 1,37 rad/s (13,1 RPM).

6. Conclusão

Nesse trabalho foi projetado um motor piezelétrico, otimizado com a ajuda de simulações computacionais, e foram realizados com sucesso vários testes experimentais do motor piezelétrico. Porém, apesar do motor se movimentar e aguentar bastante peso, esses resultados não estão ótimos, devido aos vários problemas durante a fabricação do estator: a indisponibilidade das cerâmicas PZT-5A de 0,4 mm de espessura, forçando o usinagem de cerâmicas PZT-4SW de 1 mm para 0,5 mm de espessura, e também problema de planicidade no rotor. A utilização dessas cerâmicas não permitiu uma comparação entre os resultados teóricos e experimentais, e também varias cerâmicas eram danificadas pela usinagem, o que mudou as propriedades delas. Durante a colagem das cerâmicas aconteceu também vários problemas, o maior sendo um problema de curto circuito devido á utilização de epóxi condutivo. Para a colagem, é muito importante ter uma limpeza perfeita do estator e das cerâmicas a fim de garantir uma soldagem perfeita.

7. Anexo 1: Script para plotar as curvas de Lissajou

Script Python para Abaqus:

```
from abaqus import *
from odbAccess import *
from abaqusConstants import *

#Abre o resultado da simulacao
odb=session.openOdb(name='C:/Temp/Relat_mat_alu_0p1_cc_zom.odb')
#Inicializacao das tabelas
Uy=[]
Uz=[]
f=[]
#Recuperacao dos deslocamentos em funcao da frequencia
for i in range(17,27):
    frame=odb.steps['Análise Harmônica'].frames[i]
    displacement=frame.fieldOutputs['U']
    fieldValues=displacement.values
    #Deslocamento complexo em y
    Uy+='%10.10f + %10.10f *i ; ' % (fieldValues[5].data[1], fieldValues[5].conjugateData[1])
    #Deslocamento complexo em z
    Uz+='%10.10f + %10.10f *i ; ' % (fieldValues[5].data[2], fieldValues[5].conjugateData[2])
    #Frequencia
    f.append(frame.frameValue)
#A saída desse script pode ser diretamente colocada no script Matlab
print 'Uy=', Uy[0:-3], '];'
print 'Uz=', Uz[0:-3], '];'
print 'f=', f, '];'
```

Script Matlab para plotar as curvas

```
%% Importação dos valores do script de Abaqus
clear all
close all

Uy= [0.0000528285 + 0.0000100062 *i ; 0.0000718113 + 0.0000175436 *i ;
0.0001143535 + 0.0000389154 *i ; 0.0003284377 + 0.0001804632 *i ; -
0.0001724765 + -0.0002624954 *i ; 0.0001675992 + -0.0003910197 *i ; -
0.0001701075 + 0.0001084201 *i ; -0.0000848695 + 0.0000316583 *i ; -
0.0000588724 + 0.0000154489 *i ; -0.0000455350 + 0.0000091753 *i ];
Uz= [-0.0000223292 + -0.0001005818 *i ; -0.0000387446 + -0.0001325338 *i ;
-0.0000853042 + -0.0001992817 *i ; -0.0003973015 + -0.0004936184 *i ;
0.0005541025 + 0.0001002635 *i ; 0.0008137042 + -0.0007634615 *i ; -
0.0002343605 + 0.0004644413 *i ; -0.0000679746 + 0.0002097530 *i ; -
0.0000331723 + 0.0001389388 *i ; -0.0000197554 + 0.0001046292 *i ];
f= [35806.0, 35807.0, 35808.0, 35809.0, 35810.0, 35811.0, 35812.0, 35813.0,
35814.0, 35815.0] ;

%% Uy e Uz em função da frequência

figure
[AX, H1, H2] = plotyy(f, real(Uy), f, real(Uz))
title('Deslocamento nos eixos Y e Z em função da frequência')
xlabel('Frequencia Hz')
```

```

set(get(AX(1), 'Ylabel'), 'String', 'Deslocamento em Y (m)')
set(get(AX(2), 'Ylabel'), 'String', 'Deslocamento em Z (m)')

%% Amplitude de deslocamento

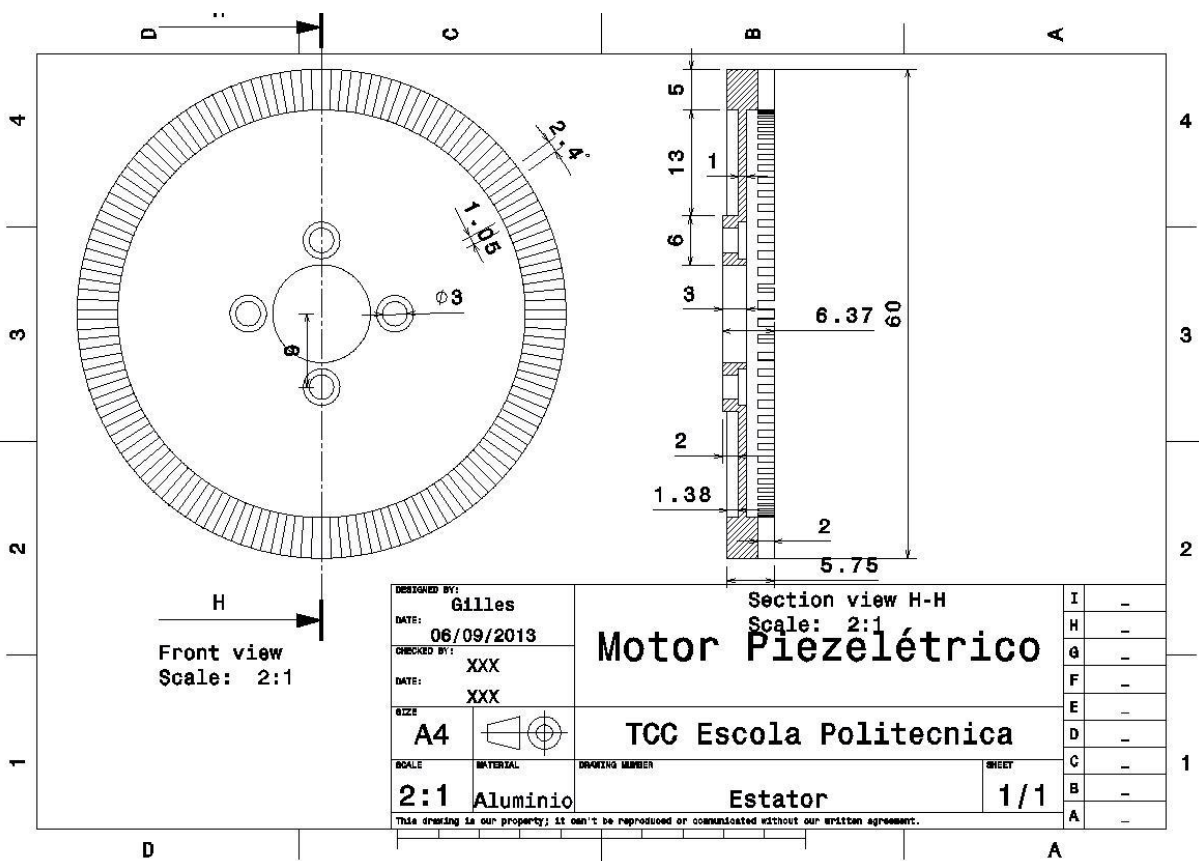
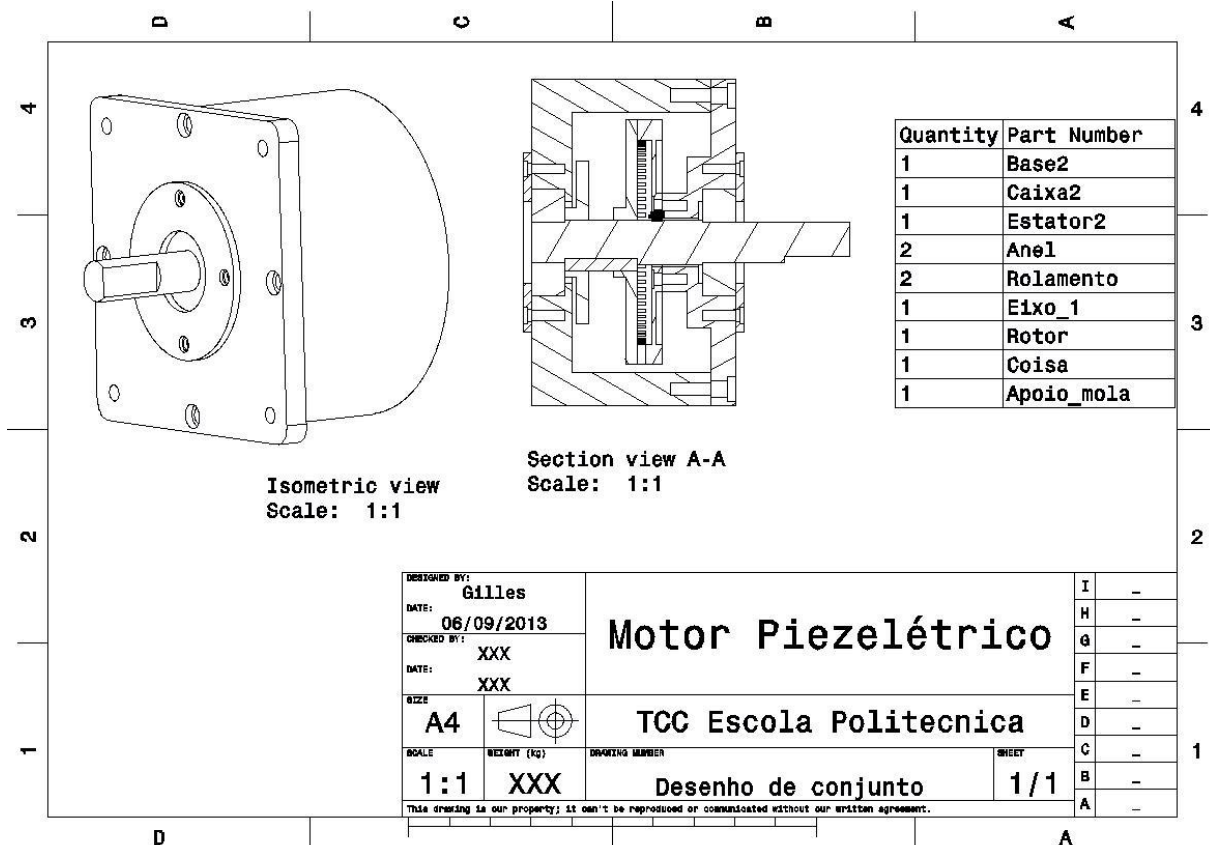
figure
plot(f, sqrt(real(Uy).^2+real(Uz).^2))
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Amplitude de deslocamento(m)')
title('Amplitude de deslocamento no plano ortogonal ao ponto de referência
(plano YZ)')

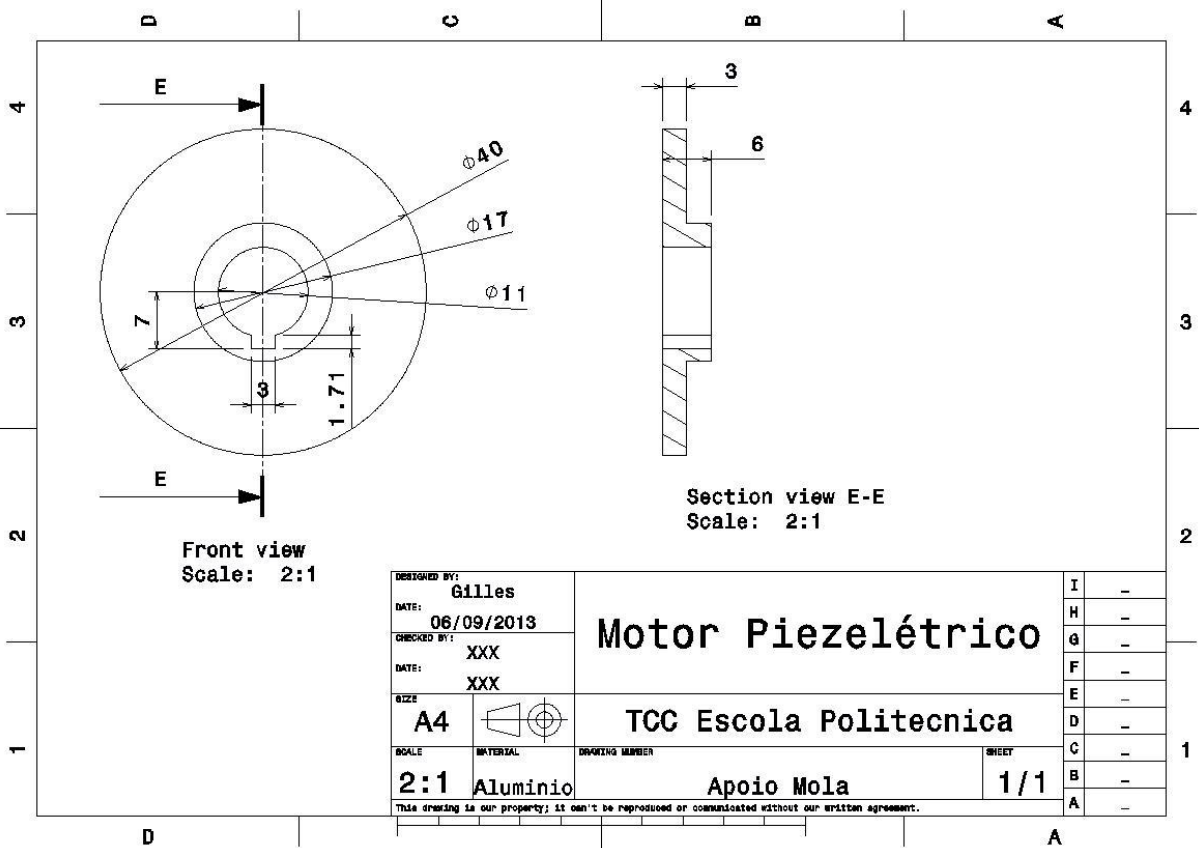
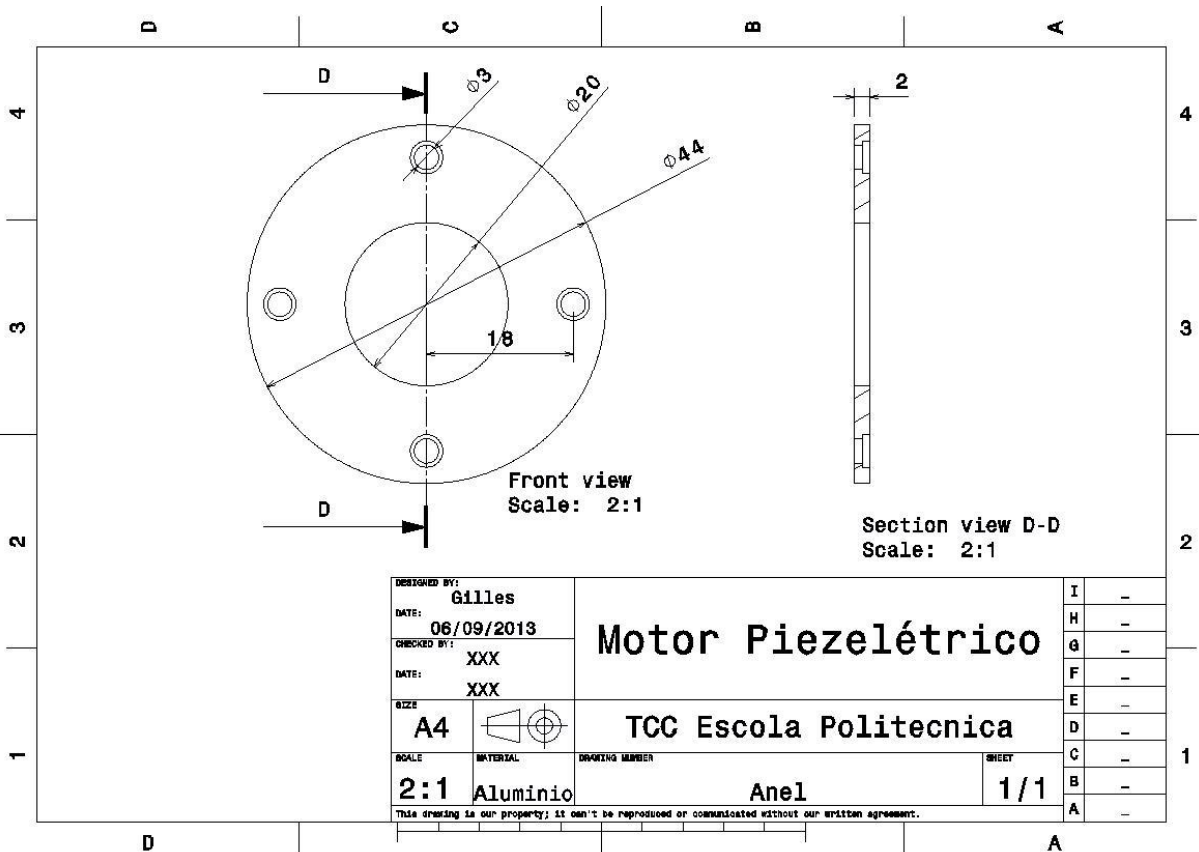
%% Plotagem das curvas de Lissajous

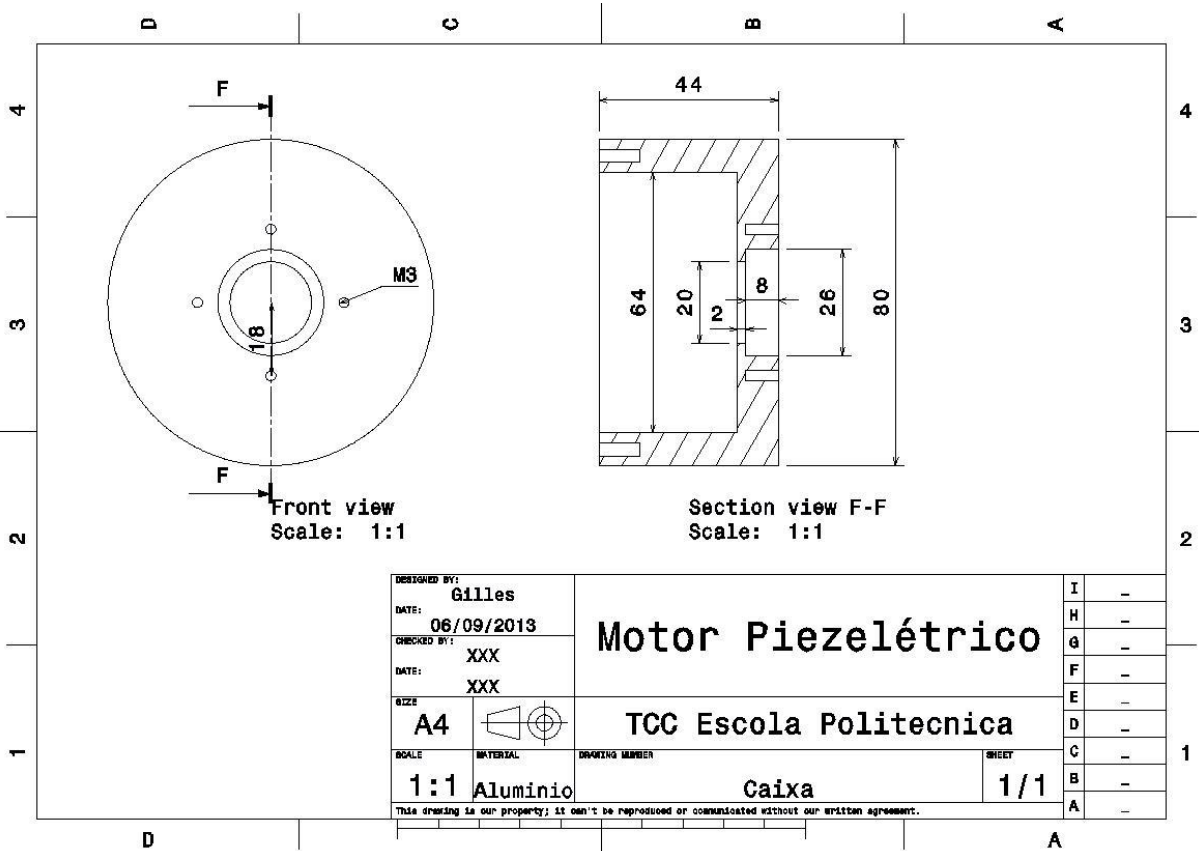
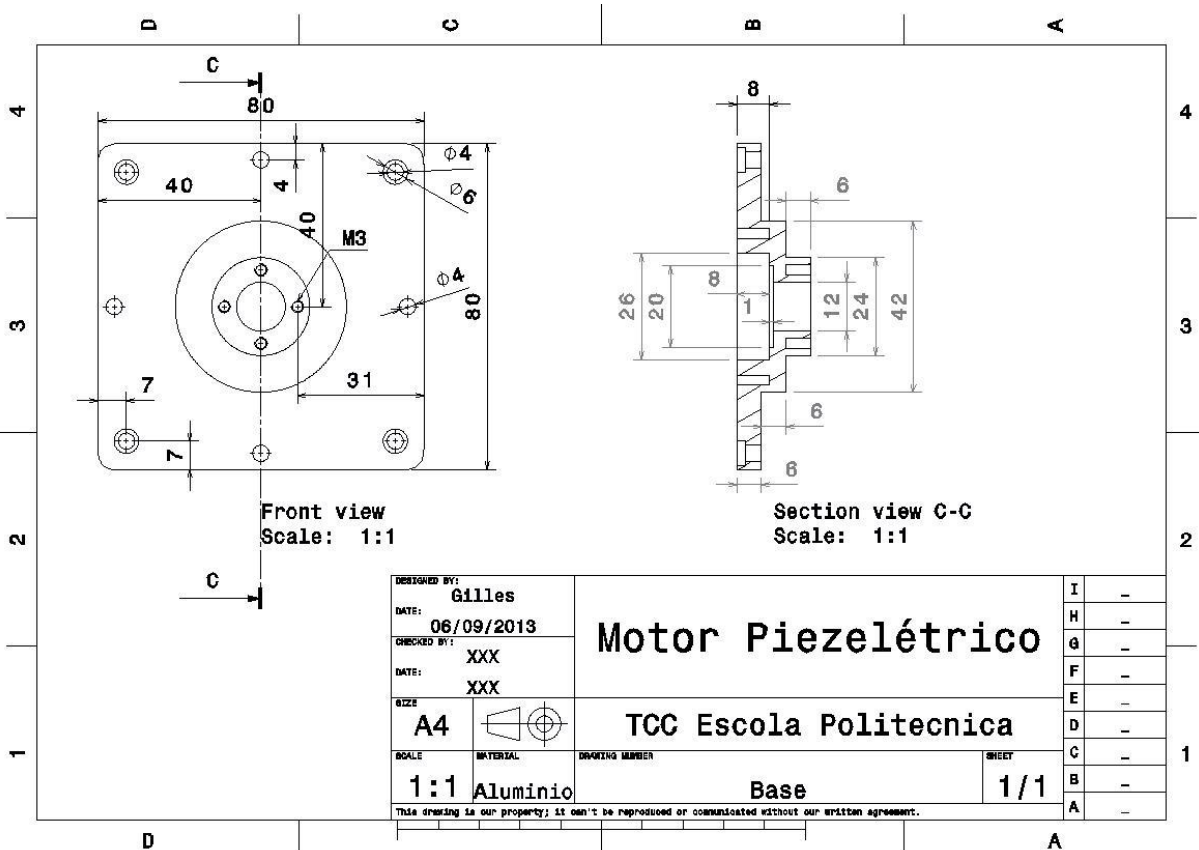
n = length(Uy);
cmap = hsv(n);
h = zeros(n, 1);
figure
hold on
for j=1:n
    y=[];
    z=[];
    for phi=0:pi/20:pi*2
        y=[y, real(Uy(j)*exp(i*phi))];
        z=[z, real(Uz(j)*exp(i*phi))];
    end
    h(j) = plot(y, z, 'color', cmap(j,:));
end
title('Curvas de Lissajou')
xlabel('deslocamento em Y (m)')
ylabel('desolcamento em Z (m)')
axis equal
legend(h, int2str(f(1)), int2str(f(2)), int2str(f(3)),
int2str(f(4)),int2str(f(5)),int2str(f(6)),int2str(f(7)),int2str(f(8)),
int2str(f(9)),int2str(f(10)))

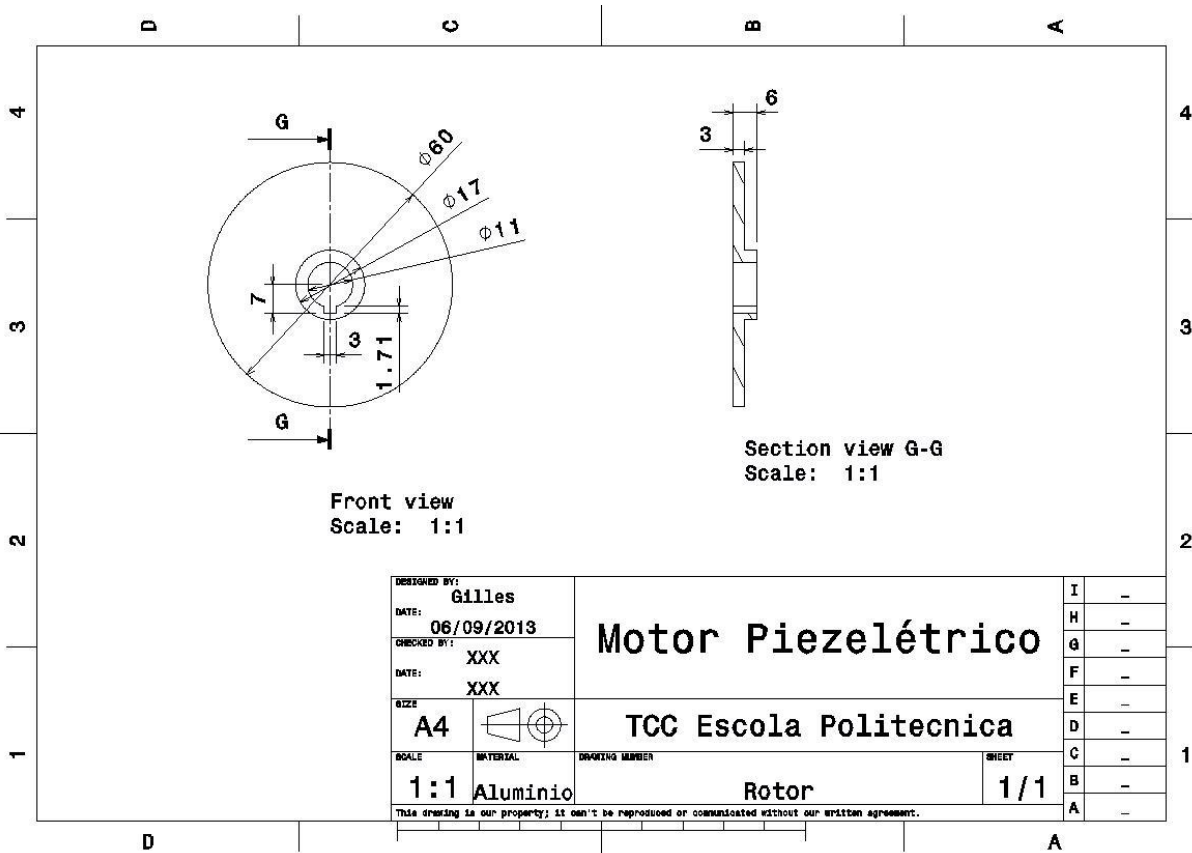
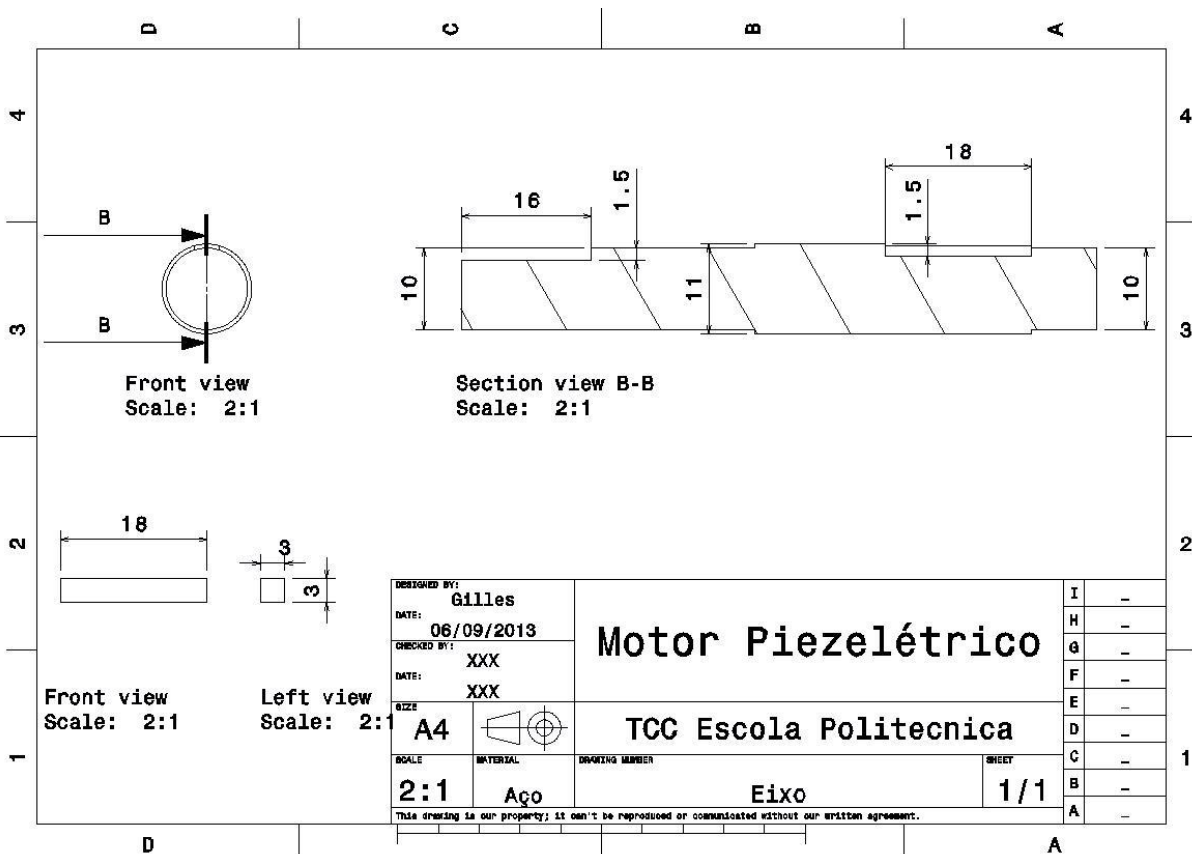
```

8. Anexo 2: Desenhos de fabricação do prototipo









Referências Bibliográficas

- [1] Ikeda, T. Fundamentals of Piezoelectricity. Oxford: Oxford University Press, 1996
- [2] Rodrigues, D P & Martins, D. F. Desenvolvimento de um Motor Piezelétrico Rotativo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011
- [3] Uchino, K; Giniewicz, J.R., Micromechanics. Nova Iorque: Marcel Dekker, Inc, 2003
- [4] Bar-Cohen, Y e Bao X, e Grandia W, “Rotary Ultrasonic Motors Actuated By Traveling Flexural Waves”, Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 5 Março 1999
- [5] Nesbitt W. Hagood & MacFarland , Andrew J., “Modeling of a Piezoelectric Rotary Ultrasonic Motor”, IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control, vol. 42, no. 2, march 1995
- [6] Flynn A. M et al ., “Piezoelectric Micromotors For Microrobots”, Ultrasonics Symposium, 1990. Proceedings., IEEE 1990 , pp 1163 - 1172 vol.3, 7 de Dezembro de 1990
- [7] Krome , J. W. & Wallaschek, J. “Influence Of The Piezoelectric Actuator On The Vibrations Of The Stator Of A Traveling Wave Motor”, Ultrasonics Symposium, 1995. Proceedings., 1995 IEEE
- [8] Hirata, Hiroshi & Ueha, Sadayuki, “Design of a Traveling Wave Type Ultrasonic Motor”, IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control, Vol. 42, No. 2, March 1995
- [9] Flynn A. M et al ., “Piezoelectric Micromotors For Microrobots”, Ultrasonics Symposium, 1990. Proceedings., IEEE 1990 , pp 1163 - 1172 vol.3, 4-7 Dec 1990
- [10] Hirata, Hiroshi & Ueha, Sadayuki, “ Characteristics Estimation of a Traveling Wave Type Ultrasonic Motor”, IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control, vol. 40, no. 4, July 1993

- [11] Manceau, J.F. & Bastien, F. & Duffait , R. “Ultrasonic Micro-Motors Stator Evaluation”, Ultrasonics Symposium, 1994. Proceedings., 1994 IEEE
- [12] Krome, J. W. & Wallaschek, J. “Influence Of The Piezoelectric Actuator On The Vibrations Of The Stator Of A Traveling Wave Motor”, Ultrasonics Symposium, 1995. Proceedings., 1995 IEEE
- [13] Jeong, S. H. et al , “Vibration Analysis Of The Stator In Ultrasonic Motor By FEM”
- [14] Ming Hao and Weishan Chen, “Analysis and Design of a Ring-type Traveling Wave Ultrasonic Motor”, Proceedings of the 2006 IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation, 2006, Luoyang, China
- [15] Bar-Cohen, Y e Bao X, “Complete Modeling of Rotary Ultrasonic Motors Actuated By Traveling Flexural Waves”, Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 1-5 Março 2000