

FREDERIK OEST MOLLER
DOUGLAS DE AQUINO CASTRO

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM PIEZOGIROSCÓPIO

São Paulo
2010

FREDERIK OEST MOLLER
DOULAS DE AQUINO CASTRO

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM PIEZOGIROSCÓPIO

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Departamento de Engenharia Mecatrônica
e Sistemas Mecânicos

Orientador: Prof. Emilio Carlos Nelli Silva

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Oest Moller, Frederik
de Aquino Castro, Douglas
Projeto e Desenvolvimento de um Micro-piezogiroscópio /
F. O. Moller, D. A. Castro. -- São Paulo, 2010.
62 p.

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

1. Giroscópio 2. Piezelétrico I. Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica
e de Sistemas Mecânicos II. t.

RESUMO

O foco deste trabalho é mostrar o princípio de funcionamento de um piezogiroscópio de massa vibrante.

O giroscópio é um dispositivo utilizado para se medir posição angular ou taxa de rotação. Existem basicamente três tipos de giroscópios extensas e vem crescendo com o aumento da sua utilização em microeletrônica. Algumas de suas aplicações incluem sensores automotivos para estabilidade e segurança, aplicações na indústria bélica em mísseis teleguiados e em aparelhos celulares.

Neste trabalho buscou-se compreender os mecanismos físicos que regem o comportamento do giroscópio de massa vibrante. Foi realizado, primeiramente, um levantamento do estado da arte sobre o assunto e posterior análise matemática do princípio envolvido no funcionamento do giroscópio. Foram realizadas simulações computacionais onde se fez análises estáticas e dinâmicas para que se obtivesse um entendimento completo de todos os parâmetros envolvidos no processo de projeto e concepção do equipamento. Para a realização das simulações foi utilizado o software de elementos finitos ANSYS versão 12.0 para as simulações computacionais. Por último, foi fabricado um protótipo e foram realizados testes para demonstração do princípio de funcionamento do piezogiroscópio.

Os resultados dos testes realizados com o protótipo estão de acordo com a teoria, onde uma variação na velocidade angular do piezogiroscópio causa também uma variação da tensão elétrica de saída das cerâmicas de sensoriamento.

ABSTRACT

This work is focused on showing the functioning principle of a vibrating mass piezogyroscope.

The gyroscope is a device mostly used for measuring angular position or rotation speed of a moving body. There are essentially three types of gyroscopes: rotating mass, optic and vibrating mass. The applications for gyroscopes are wide and growing due to its use in the microelectronics industry. Some of its applications include automotive stability and safety sensors, applications in the weapons industry for self-guided missiles and also in cell phones.

The search for comprehension of the physical mechanisms that guide the vibrating mass gyroscopes behavior is the main goal of this work. First, a survey about the state of the art on this matter was made and latter a mathematical analysis of the principle involved took place. Static and dynamic analyses are made with computer simulations to obtain a complete understanding about all parameters involved in the design and conception of this device. To perform the computer simulations, the finite element software ANSYS 12.0 is used. At last, a prototype has been manufactured and tests with a prototype took place to demonstrate the piezogyroscope's principle.

The test results with the prototype are consistent with the theory, where a variation in the gyroscope's angular velocity causes a variation in the output electric tension of the sensing ceramics.

Lista de Figuras

Figura 1 - Giroscópio com vibrações torcionais e flexionais.	2
Figura 2 - Controle de estabilidade eletrônica de um carro.	5
Figura 3 - Sensor de detecção de fase de marcha.	6
Figura 4 - Cinemática do Piezogiroscópio.	8
Figura 5 - Rotações dos ângulos de Euler da seção transversal da barra.....	9
Figura 6 - Representação esquemática do domínio Ω do problema com fronteira Γ	16
Figura 7 - Domínio Ω discretizado	17
Figura 8 - Esboço do Piezogiroscópio modelado no ANSYS.....	23
Figura 9 - Imagem lateral do Piezogiroscópio gerado em ANSYS (a).	24
Figura 10 - Seleção do sólido 5 (a).....	25
Figura 11 - Propriedades a serem determinadas.....	26
Figura 12 - Valores para o alumínio (material 1).....	26
Figura 13 - Densidade cerâmica.....	27
Figura 14 - Permittividade cerâmica.	27
Figura 15 - Elasticidade cerâmica.....	28
Figura 16 - Matriz piezelétrica cerâmica.	28
Figura 17- Sólidos discretizados (a)	29
Figura 18 - Número de modos de vibrar a serem extraídos.....	31
Figura 19 - Freqüências a serem varridas.	31
Figura 20 - Forma deformada do primeiro modo de vibrar. Error! Bookmark not defined.	
Figura 21 - Forma deformada do segundo modo de vibrar.....	33

Figura 22 - Definição da velocidade angular.....	34
Figura 23 - Escolha análise harmônica.....	35
Figura 24 - Tensão por frequência com velocidade angular igual a 500 rad/s	36
Figura 25 - Tensão por frequência com velocidade angular igual a 1000 rad/s	37
Figura 26 – Ativação do efeito de Coriolis	39
Figura 27 – Diagrama de Campbell	42
Figura 28 – Giroscópio deformado com excitação das cerâmicas em concordância de fase e polarização invertida.....	43
Figura 29 - Giroscópio deformado com excitação das cerâmicas em oposição de fase e polarização invertida.....	43
Figura 30 - Deformação das cerâmicas devido a polarização das cerâmicas e campo elétrico aplicado.....	44
Figura 31 – Comparação das respostas do giroscópio com diferentes excitações das cerâmicas.	46
Figura 32 - Tensão x Rotação x Frequência.....	48
Figura 33 - Tensão x Rotação x Frequência (foco em 19879 Hz)	48
Figura 34 - Tensão x Rotação em 19879 Hz	49
Figura 35 - Mecanismo proposto para excitação do Piezogiroscópio.....	50
Figura 36 - (a) Circuito de amplificação do sinal do Piezogiroscópio. (b) Circuito de filtragem dos valores de tensão.	Error! Bookmark not defined.
Figura 37 - Desenho esquemático do circuito eletrônico de acionamento do Motor de Corrente Contínua.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 38 - Fluxograma do Software desenvolvido para o acionamento e controle do Motor de Corrente Contínua.	Error! Bookmark not defined.

Sumário

1 - Introdução.....	1
1.1 - Revisão Bibliográfica.....	2
1.2 - Objetivos	4
1.3 - Justificativa	4
2 – Modelagem matemática.....	7
2.1 – Cinemática do Piezogiroscópio (movimento translacional)	8
2.2 – Cinemática do Piezogiroscópio (movimento rotacional).....	10
2.3 – Equações governantes do movimento	12
3 – Modelagem e simulação em ANSYS	16
3.1 - Introdução ao Método dos Elementos Finitos aplicado à Estruturas Piezelétricas	16
3.2 - Definição das Equações do Problema	17
3.2.1 - Equações Constitutivas e de Equilíbrio	17
3.2.2 - Condições de Contorno	19
3.3 - Aplicação do Método dos Elementos Finitos	20
3.3.1 Acoplamento das equações	20
3.3.2 Computação	21
3.4 – Simulação no ANSYS	22
3.4.1 - Geração dos Sólidos	22
3.4.2 – Geração da malha	25
3.4.3 – Análises	30
3.4.4 – Análise Modal	30
3.4.5 – Análise Harmônica.....	34

3.4.6 – Reprojetto	37
3.4.7 - Considerações sobre a simulação no ANSYS.....	38
3.4.8 – Resultados das simulações	42
4 - Resultados.....	50
4.1 - Projeto do Protótipo	50
4.1.1 Mecanismo de excitação do Piezogiroscópio	50
4.1.2 Acionamento do Motor de Corrente Contínua.....	Error! Bookmark not defined.
5 – Conclusão e discussão	52
5.1 – Conclusão	52
5.2 – Discussão.....	Error! Bookmark not defined.
Bibliografia	54

1 - Introdução

Os giroscópios são os equipamentos mais utilizados hoje em dia para se medir ângulo de rotação ou mesmo velocidade de rotação em inúmeras áreas diferentes. Esses aparelhos podem ser utilizados em automóveis, equipamentos militares como mísseis teleguiados ou mesmo em simples telefones celulares. Devido ao crescente uso é importante que seu preço diminua na mesma medida em que sua precisão se mantenha, para que dessa forma o giroscópio de massa vibrante possa ser utilizado em maior escala.

Existem basicamente três tipos de giroscópios que são utilizados hoje: de massa vibrante, de massa giratória e óptico (1). Existem diversas situações que exigem o uso de um giroscópio e dependendo da aplicação o uso de um ou outro giroscópio pode trazer resultados ótimos. O giroscópio de massa girante naturalmente não é utilizado para situações em que manter o tamanho o menor possível seja prioridade como em aparelhos eletrônicos. Nesses casos os giroscópios ópticos ou de massa vibrante são os mais utilizados. Dentre os dois restantes, os de massa vibrante são os mais comumente utilizados devido à sua simplicidade e baixo preço. Nestes uma vibração primária é induzida na barra que está engastada em uma base. Quando essa base é rotacionada, uma vibração secundária aparece na barra devido a forças de Coriolis e através da medição dessa vibração secundária é possível calcular a rotação da base (1).

Existem vários tipos diferentes de giroscópios de massa vibrante, porém todos seguindo o mesmo princípio. O que varia entre eles geralmente é a geometria da área de seção transversal (quadrada, triangular, circular), porém outros aspectos podem variar como o eixo onde ocorre a rotação ou a localização dos atuadores e sensores piezelétricos. O efeito giroscópico é influenciado pelo projeto do giroscópio, mas pode ser amplificado com a aplicação de um campo elétrico polarizado, amplitude da vibração primária ou a otimização do comprimento da viga, por exemplo.

Nesse trabalho será estudado um giroscópio de seção transversal quadrada com duas cerâmicas piezelétricas, uma funcionando como atuador para causar a vibração primária na viga e outra funcionando como sensor para medir a vibração

secundária causada pela rotação da base onde está engastada a viga. O giroscópio será modelado utilizando o software ANSYS e posteriormente será construído um protótipo para análise e comparação com os dados teóricos e para observação indireta do efeito giroscópico.

1.1 - Revisão Bibliográfica

O giroscópio de massa vibrante está sujeito a uma vibração, causada pela excitação de uma cerâmica piezelétrica, e a uma rotação da base em torno do eixo longitudinal. A Força de Coriolis gerada pela rotação da base onde o giroscópio está engastado causa uma segunda vibração na barra que quando medida pode ser usada para se determinar a taxa de rotação da base. Em (1) utiliza-se um sistema parecido, com uma barra com uma massa presa à sua ponta. Esse giroscópio está sujeito a uma rotação em torno do eixo Z, como mostrado na Figura 1, o que causa uma vibração secundária torcional, proporcional à taxa de rotação da base. Essa segunda vibração é medida através de uma segunda cerâmica piezelétrica localizada como mostrado na Figura 1.

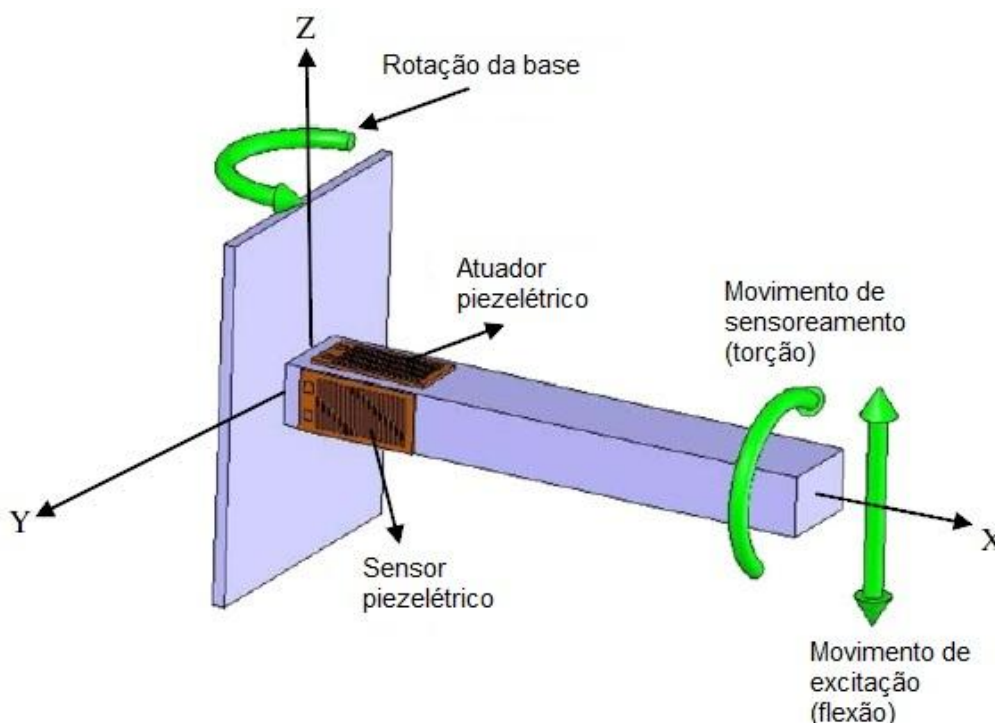


Figura 1 - Giroscópio com vibrações torcionais e flexionais.

Uma massa pode ser acoplada à ponta do giroscópio e é utilizada a fim de se aumentar o efeito giroscópico. Outras técnicas com esse fim também são utilizadas em (2). No caso foi estudado um giroscópio cerâmico de seção circular sólida. A

escolha desse tipo se dá, pois na barra com seção quadrada existe interação entre os modos de excitação e o de sensoriamento devido a dificuldades na adesão da piezocerâmica ao corpo de metal (3). Nesse estudo foi mostrado que um campo elétrico polarizado aplicado ao giroscópio aumenta a sensibilidade do mesmo e assim a eficácia do giroscópio. Existe uma vasta gama de variações para os giroscópios de massa vibrante. Normalmente a variação se encontra no formato da seção transversal da barra que pode ser circular (sólida ou tubo), triangular, quadrada, garfo entre outras.

Métodos experimentais podem ser utilizados para estudar giroscópios piezelétricos e são importantes na verificação de novos projetos. Porém o método experimental é caro e demanda muito tempo o que o torna inviável para ser utilizado muito freqüentemente. Uma análise possível desses giroscópios é através de uma analogia com circuitos equivalentes. Nesse caso a vibração do piezelétrico que é contínua, deve ser discretizada (como em um sistema digital). Os circuitos são representados por equações diferenciais ordinárias ao invés das equações diferenciais parciais que descrevem o movimento contínuo do piezelétrico. Dessa forma o modelo é simplificado, porém fornece apenas informações parciais. As formas dos modos de vibrar, por exemplo, não podem ser previstas a partir de um modelo de circuito (4).

Uma característica importante do giroscópio é a qualidade da sua manufatura, pois pequenas imperfeições em sua fabricação podem levar ao fato de os dois modos de vibrar não terem frequências naturais idênticas. Isso acarretaria um cálculo impreciso da taxa de rotação do giroscópio. Os efeitos dessas imperfeições podem ser minimizados com um procedimento de balanceamento mecânico da viga. Esses procedimentos são difíceis de serem realizados, especialmente em giroscópios pequenos, o que torna o procedimento caro e demorado. Uma outra maneira para a correção dessas imperfeições é a utilização de um sistema em malha fechada utilizando sensores e atuadores para minimizar os efeitos causados pelo desbalanceamento. Esse método mostrou-se eficiente quando utilizado um ganho apropriado para o sistema (5).

1.2 - Objetivos

O objetivo central do presente trabalho é o projeto e a construção de um piezogiroscópio de viga vibrante, que poderá ser utilizado para medir ângulos ou taxa de ângulos de rotação.

Inicialmente serão discutidas as equações que descrevem um piezogiroscópio de viga vibrante de acordo com o modelo estrutural mostrado na Figura 1, para então ser construído o modelo em elementos finitos. Através deste modelo, poderão ser realizadas simulações da estrutura em ANSYS.

A fase final consiste em projetar o protótipo, simulá-lo em ANSYS e então fabricá-lo. Com o protótipo em mãos, serão efetuados testes para validar se os resultados obtidos computacionalmente foram atingidos com a fabricação do piezogiroscópio.

1.3 - Justificativa

O giroscópio é o equipamento mais utilizado para medir rotação angular ou taxa de rotação angular em diferentes aplicações. São altamente desejados para o uso em navegação inercial, estabilidade e controle de automóveis e para instrumentação biomédica. Possuem também baixo custo, alto desempenho e baixo consumo.

Na década de 1990 o piezogiroscópio foi introduzido no Controle de Estabilidade Eletrônica (ESC) de carros, equipamento mostrado na Figura 2. Considerado atualmente um dos mais poderosos sistemas de salvamento de vidas na indústria automotiva, pois permite detectar caso de capotamento, auxiliando no acionamento dos *airbags*. Está também presente nos equipamentos de GPS mais modernos que vem pré-instalados em automóveis.

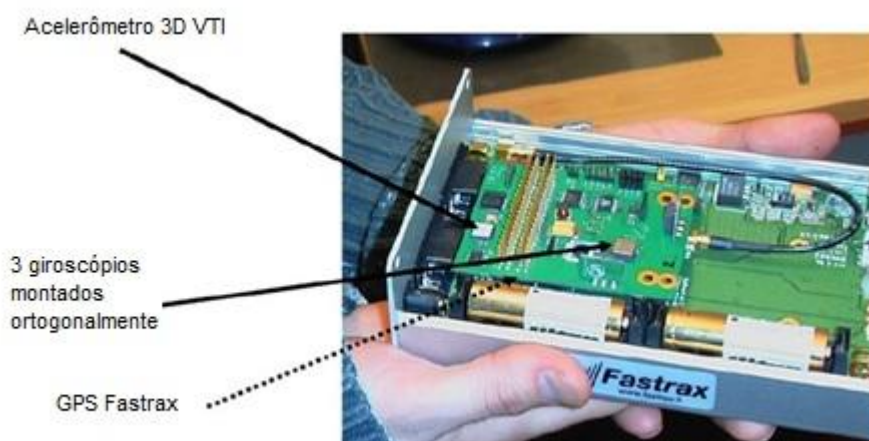


Figura 2 - Controle de estabilidade eletrônica de um carro.

Outra aplicação bastante atual de piezogiросcópios é na navegação inercial. A orientação, navegação e controle de navios, aeronaves e espaçonaves tem se utilizado desta técnica para modernizar suas formas de pilotagem. Satélites também têm utilizado esta tecnologia para o controle e estabilização de altitude de suas órbitas.

Em bioengenharia, piezogiросcópios baseados em sensores de detecção de fase de marcha (*GPDS*) são utilizados em conjuntos com simulações elétricas funcionais programáveis (*FES*) para ajudar pessoas com dificuldade de locomoção, como mostrado na Figura 3. Esse sensor é inserido na sola do sapato e detecta em tempo real o ciclo de marcha de uma passada completa, auxiliando assim o usuário a realizar um movimento de pernas mais coordenado.

Outras áreas nas quais piezogiросcópios se destacam são a militar, presente em mísseis táticos e sistema de armas inteligentes; na área de eletrônicos, estando presente no sensor de estabilização de imagem de câmeras fotográficas e câmeras de vídeo; no controle de máquinas e robótica e na indústria de celulares.

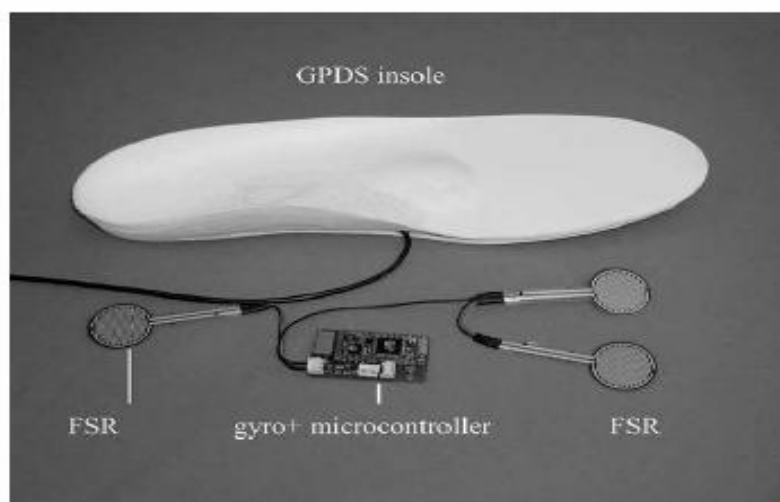


Figura 3 - Sensor de detecção de fase de marcha.

Giroscópios construídos através de vigas vibrantes estão se tornando rapidamente os giroscópios mais utilizados nas mais diferentes aplicações comerciais, tomando assim o espaço dos giroscópios eletro-mecânicos tradicionais, pois comparado a estes, possuem estrutura simples, alta sensibilidade, alta frequência de resposta e inerente estabilidade de temperatura.

2 – Modelagem matemática

Nessa seção serão discutidas as equações que regem os movimentos do giroscópio. O princípio de Hamilton é utilizado para se obter as equações de movimento. É assumido que a teoria de Euler-Bernoulli pode ser aplicada nesse caso e dessa forma os efeitos de deformação por cisalhamento são desprezados. A barra é considerada fina (pequena espessura em relação ao comprimento).

Um esboço da barra com a massa presa a ela é mostrada na Figura 4. A barra é considerada como sendo reta, uniforme e metálica com comprimento L e massa por unidade de comprimento $\rho(x)$. Uma massa M de dimensões finitas (l_M, b_M, h_M) é presa na ponta livre da barra. O sistema de coordenadas inercial é denotado por (A_1, A_2, A_3) . O sistema de coordenada girante é denotado por (X, Y, Z) com vetores unitários ortogonais (a_x, a_y, a_z) . Vibrações primárias de flexão $w(x,t)$ são produzidas por um atuador piezelétrico fixo na superfície da barra. A base está sujeita a duas rotações diferentes: a rotação primária Ω_3 que deve ser medida pelo giroscópio e a rotação secundária Ω_1 que causa erros na medição da rotação primária. Devido à rotação primária Ω_3 , vibrações torcionais secundárias $\theta(x,t)$ são induzidas na barra.

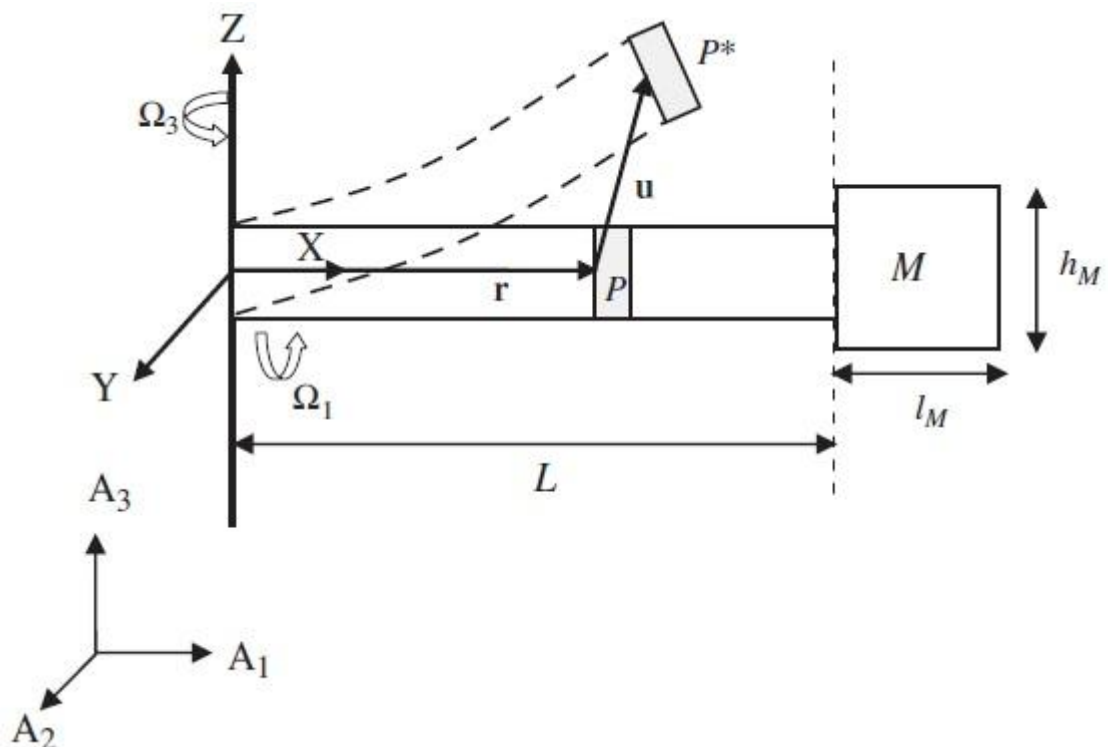


Figura 4 - Cinemática do piezogirolscópio.

2.1 – Cinemática do piezogirolscópio (movimento translacional)

Para descrever o movimento translacional da barra, um vetor cartesiano $u=\{u \ v \ w\}^T$ (com as três variáveis sendo: $u_1=u$ é axial $u_2=v$ é lateral e $u_3=w$ é a deformação devido à flexão) medido no sistema de coordenadas (X, Y, Z) é utilizado. O ponto P do eixo central da barra é levado ao ponto P*. Posição e velocidade do ponto P* em relação à base $\{A_i\}$ podem ser expressas como: (6)

$$\mathbf{r}_{p*} = \mathbf{r}_p + \mathbf{u}_{p*} \quad (1)$$

$$\frac{d(\mathbf{r}_{p*})}{dt} = \frac{d\mathbf{u}_{p*}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{r}_p + \mathbf{u}_{p*}), \quad \mathbf{r}_p = s\mathbf{a}_x, \quad \mathbf{u}_{p*} = u\mathbf{a}_x + v\mathbf{a}_y + w\mathbf{a}_z \quad (2)$$

Na equação (2), $\boldsymbol{\Omega} = \{\Omega_1, \Omega_2 = 0, \Omega_3\}^T$ é o vetor de rotação da base em relação ao sistema (A_1, A_2, A_3) e s é a posição do ponto P no sistema de coordenadas girante. Simplificando a equação, já que nesse caso não há vibração lateral ou axial, temos:

$$\frac{d(\mathbf{r}_{p*})}{dt} = f\mathbf{a}_x + g\mathbf{a}_y + h\mathbf{a}_z \quad (3)$$

onde:

$$f = 0, \quad g = -w\Omega_1 + s\Omega_3, \quad h = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (4)$$

Dessa forma, a energia cinética translacional da barra é dada por:

$$T_1 = \frac{1}{2} \int_0^L \rho_b \frac{d(\mathbf{r}_{p*})}{dt} dx \quad (5)$$

$$T_1 = \frac{1}{2} \int_0^L \rho_b (f^2 + g^2 + h^2) dx \quad (6)$$

Já que a massa está fixa na ponta da barra, o procedimento para calcular a energia cinética translacional da massa é análogo.

$$\mathbf{r}_M = \mathbf{r}_q + \mathbf{u}_{q*} + \mathbf{r}_m \quad (7)$$

$$\frac{d(\mathbf{r}_M)}{dt} = \frac{d(\mathbf{u}_{q*})}{dt} + \frac{d(\mathbf{r}_m)}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{r}_q + \mathbf{u}_{q*} + \mathbf{r}_m) \quad (8)$$

Simplificando mais, a velocidade da massa pode ser escrita como:

$$\frac{d(\mathbf{r}_M)}{dt} = f_M \mathbf{a}_X + g_M \mathbf{a}_Y + h_M \mathbf{a}_Z \quad (9)$$

onde:

$$f_M = -\frac{l_M}{2} \sin \psi_L \frac{\partial \psi_L}{\partial t} \quad (10)$$

$$g_M = \Omega_3 L - \Omega_1 w_L + \Omega_3 \frac{l_M}{2} \cos \psi_L + \Omega_1 \frac{l_M}{2} \sin \psi_L \quad (11)$$

$$h_M = \frac{\partial w_L}{\partial t} + \frac{l_M}{2} \cos \psi_L \frac{\partial \psi_L}{\partial t} \quad (12)$$

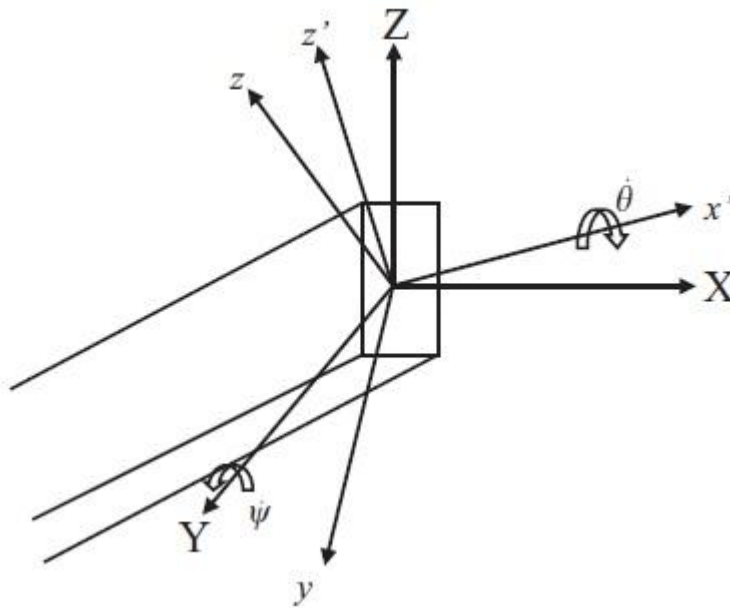


Figura 5 - Rotações dos ângulos de Euler da seção transversal da barra.

Assumindo pequenas deflexões e ignorando termos não-lineares temos:

$$f_M = 0 \quad (13)$$

$$g_M = \Omega_3 L - \Omega_1 w_L + \Omega_3 \frac{l_M}{2} + \Omega_1 \frac{l_M}{2} \psi_L \quad (14)$$

$$h_M = \frac{\partial w_L}{\partial t} + \frac{l_M}{2} \frac{\partial \psi_L}{\partial t} \quad (15)$$

Então a energia cinética translacional da massa final é:

$$T_{1M} = \frac{1}{2} M \left(\frac{d(r_M)}{dt} \right)^2 \quad (16)$$

$$T_{1M} = \frac{1}{2} M (f_M^2 + g_M^2 + h_M^2) \quad (17)$$

2.2 – Cinemática do Piezogirosópio (movimento rotacional)

A deformação do sistema de sua configuração original é descrito aqui utilizando-se ângulos de Euler. (7)

Em geral, cada seção transversal da barra sofre um deslocamento elástico do eixo central e uma rotação. A rotação do eixo central, de sua posição inicial para a posição deformada, é descrita utilizando-se rotações anti-horárias sucessivas (ângulos de Euler), com o ângulo de rotação denotado por $\psi(x, t)$ e $\theta(x, t)$, como mostrado na Figura 5, onde $\psi(x, t) = \partial w(x, t) / \partial x$.

A primeira rotação ψ sobre o eixo Y, leva o sistema de coordenadas (X, Y, Z) para (x', y'=Y, z'). A segunda rotação θ sobre o eixo x', leva (x', y', z') para a posição final (x=x', y, z). Os três trios de vetores unitários se relacionam da seguinte maneira:

$$\begin{Bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{Bmatrix} = [R_\theta] \begin{Bmatrix} a_{x'} \\ a_{y'} \\ a_{z1} \end{Bmatrix} = \underbrace{[R_\theta][R_\psi]}_R \begin{Bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{Bmatrix} \quad (18)$$

onde:

$$[R_\theta] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, [R_\psi] = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ \sin \theta \sin \psi & \cos \theta & \sin \theta \cos \psi \\ \cos \theta \cos \psi & -\sin \theta & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix}$$

As matrizes de transformação $[R_\theta]$, $[R_\psi]$ e $[R]$ são matrizes ortogonais ou unitárias e então possuem a propriedade $[R]^{-1} = [R]^T$. Por outro lado a velocidade angular da barra é dada por:

$$\omega = \Omega_1 \mathbf{a}_x + \Omega_3 \mathbf{a}_z + \frac{\partial \psi}{\partial t} \mathbf{a}_y + \frac{\partial \theta}{\partial t} \mathbf{a}_x \quad (20)$$

A velocidade angular absoluta ω do sistema do eixo principal (x,y,z) pode ser obtida utilizando as equações (17) e (18) como se segue:

$$\begin{aligned} \omega = & \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + \Omega_1 \cos \psi - \Omega_3 \sin \psi \right) \mathbf{a}_x + \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} \cos \theta + \Omega_1 \sin \theta \sin \psi + \Omega_3 \sin \theta \cos \psi \right) \mathbf{a}_y \\ & + \left(-\frac{\partial \psi}{\partial t} \sin \theta + \Omega_1 \cos \theta \sin \psi + \Omega_3 \cos \theta \cos \psi \right) \mathbf{a}_z \end{aligned} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ \end{pmatrix}$$

Assumindo pequenos ângulos de flexão e torção, os componentes da velocidade angular da barra podem ser dadas como:

$$\omega_x = \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + \Omega_1 - \Omega_3 \psi \right) \quad (22)$$

$$\omega_y = \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} + \Omega_1 \theta \psi + \Omega_3 \theta \right)$$

$$\omega_z = (\Omega_1 \psi + \Omega_3)$$

A energia cinética rotacional da barra e da massa final é então:

$$T_2 = \frac{1}{2} \int_0^L (I_{xb} \omega_x^2 + I_{yb} \omega_y^2 + I_{zb} \omega_z^2) dx$$

$$T_{2M} = \frac{1}{2} (I_{xM} \omega_x^2 + I_{yM} \omega_y^2 + I_{zM} \omega_z^2) \quad (23)$$

onde I_{xb}, I_{yb}, I_{zb} e I_{xM}, I_{yM}, I_{zM} são os momentos de inércia da barra e massa nos eixos X, Y e Z, respectivamente.

2.3 – Equações governantes do movimento

O Princípio de Hamilton é dado como:

$$\int_{t_1}^{t_2} \{\delta T - \delta V + \delta W_{nc}\} dt = 0 \quad (24)$$

onde T é a energia cinética total do sistema, V é a energia potencial total e W_{nc} é o trabalho não-conservativo total realizado no sistema. Ignorando os termos de inércia rotativa, a energia cinética total do sistema é dada por:

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L [\rho(x)(f^2 + g^2 + h^2) + I_x(x)\omega_x^2] dx + \frac{1}{2} M(f_M^2 + g_M^2 + h_M^2) + \frac{1}{2} (I_{xM}\omega_x^2 + I_{yM}\omega_y^2 + I_{zM}\omega_z^2) \quad (25)$$

A energia potencial total do sistema também pode ser escrita como:

$$V = \frac{1}{2} \int_0^L \left[EI_y(x) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + GJ(x) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 \right] dx \quad (26)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 \rho(x) &= (\rho_b + S(x)\rho_p), \quad I_x(x) = (I_{xb} + S(x)I_{xp}) \\
 EI_y(x) &= (EI_b + S(x)EI_p), \quad GJ(x) = (GJ_b + S(x)GJ_p) \\
 S(x) &= H(x - l_1) - H(x - l_2)
 \end{aligned} \tag{27}$$

e EI_b e EI_p são a rigidez de flexão da barra e do atuador piezelétrico, respectivamente, GJ_b e GJ_p são a rigidez torcional da barra e do atuador piezelétrico respectivamente e $H(x)$ é a função “Heaviside”.

Na aproximação Hamiltoniana, o atuador piezelétrico controla o momento M_p e os efeitos de amortecimento são calculados na seguinte expressão:

$$\delta W_{nc} = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{\partial^2 M_p}{\partial x^2} \delta w dx + C_B \int_0^L \frac{\partial w}{\partial t} \delta w dx + C_T \int_0^L \frac{\partial \theta}{\partial t} \delta \theta dx \tag{28}$$

onde:

$$M_p = -\frac{1}{2} b E_p d_{31} (t_b + t_p) V_p(t) S(x) = M_{p0} V_p(t) S(x) \tag{29}$$

Substituindo as equações (23) a (27) na equação (22), as equações de movimento e condições de contorno podem ser obtidas:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 M_p}{\partial x^2} &= \rho(x) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - w \Omega_1^2 + x \Omega_1 \Omega_3 \right) + C_B \frac{\partial w}{\partial t} \\
 -I_x(x) \Omega_3 &\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial t \partial x} + \Omega_3 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI_y(x) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right) \\
 I_x(x) &\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \Omega_3 \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} \right) + C_T \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(GJ(x) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \right) = 0 \\
 w|_{x=0} &= 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x}|_{x=0} = 0, \quad \theta|_{x=0} = 0
 \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
I_x(x) \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + \Omega_1 - \Omega_3 \frac{\partial w}{\partial x} \right) \Big|_{x=L} \Omega_3 + M \left(-\Omega_3 \left(L + \frac{l_M}{2} \right) + \Omega_1 \left(w + \frac{l_M}{2} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) \Big|_{x=L} \Omega_3 \\
- M \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{l_M}{2} \frac{\partial^3 w}{\partial t^2 \partial x} \right) \Big|_{x=L} + EI_y(x) \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) \Big|_{x=L} = 0
\end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned}
M \left(-\Omega_1 \frac{l_M}{2} - \frac{l_M}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{l_M}{2} \frac{\partial^3 w}{\partial t^2 \partial x} \right) \Big|_{x=L} \right) + I_{xM} \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + \Omega_1 - \Omega_3 \frac{\partial w}{\partial x} \right) \Big|_{x=L} \Omega_3 \\
- I_{yM} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial t^2 \partial x} + \Omega_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} + \Omega_3 \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) \Big|_{x=L} \\
+ I_{yM} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + \Omega_1 \theta \frac{\partial w}{\partial x} + \Omega_3 \theta \right) \Big|_{x=L} \Omega_1 \theta_L - I_{zM} \left(\Omega_1 \frac{\partial w}{\partial x} + \Omega_3 \right) \Big|_{x=L} \theta_L \\
- EI_y(x) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \Big|_{x=L} = 0
\end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned}
-I_{xM} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - \Omega_3 \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} \right) \Big|_{x=L} + I_{yM} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + \Omega_1 \theta \frac{\partial w}{\partial x} + \Omega_3 \theta \right) \Big|_{x=L} \Omega_1 \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=L} \\
- I_{yM} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + \Omega_1 \theta_L \frac{\partial w}{\partial x} + \Omega_3 \theta \right) \Big|_{x=L} \Omega_3 - GJ(x) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Big|_{x=L} = 0
\end{aligned} \quad (35)$$

Nas equações (28) a (33), Ω_3 é a velocidade angular da base, que deve ser medida utilizando o giroscópio. A rotação secundária da base (Ω_1) é considerada para se analisar o efeito de *cross-axis* produzido pela presença de tais rotações secundárias. Para simplificar o problema Ω_1 será ignorado nas etapas seguintes. Dessa forma, as equações de movimento e condições de contorno podem ser simplificadas para:

$$\rho(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + C_B \frac{\partial w}{\partial t} - I_x(x) \Omega_3 \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial t \partial x} + \Omega_3 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E I_y(x) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right) = 0 \quad (36)$$

$$I_x(x) \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \Omega_3 \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} \right) + C_T \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(G J \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \right) = 0 \quad (37)$$

$$w|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x}|_{x=0} = 0, \quad \theta|_{x=0} = 0 \quad (38)$$

$$I_x(x) \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} - \Omega_3 \frac{\partial w}{\partial x} \right) |_{x=L} \Omega_3 - M \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{l_M}{2} \frac{\partial^3 w}{\partial t^2 \partial x} \right) |_{x=L} + E I_y(x) \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) |_{x=L} = 0 \quad (39)$$

$$M \left(-\frac{l_M}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{l_M}{2} \frac{\partial^3 w}{\partial t^2 \partial x} \right) |_{x=L} \right) + I_{xM} \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} - \Omega_3 \frac{\partial w}{\partial x} \right) |_{x=L} \Omega_3 - I_{yM} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial t^2 \partial x} + \Omega_3 \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) |_{x=L} - E I_y(x) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) |_{x=L} = 0 \quad (40)$$

$$-I_{xM} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - \Omega_3 \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} \right) |_{x=L} - I_{yM} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + \Omega_3 \theta \right) |_{x=L} \Omega_3 - G J(x) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) |_{x=L} = 0$$

Como visto nas equações (34) e (35), as equações que governam o sistema estão acopladas através da velocidade de rotação da base Ω_3 .

3 – Modelagem e simulação em ANSYS

3.1 - Introdução ao Método dos Elementos Finitos aplicado à Estruturas Piezelétricas

Informações Iniciais

Considere o domínio piezelétrico Ω na Figura 6, através do qual se deseja determinar o campo de deslocamentos, u , e o campo elétrico potencial, φ . Os campos u e φ satisfazem um conjunto de equações diferenciais que representam a física do problema contínuo considerado. Equações de contorno são geralmente impostas na fronteira do domínio, Γ , para completar a definição do problema.

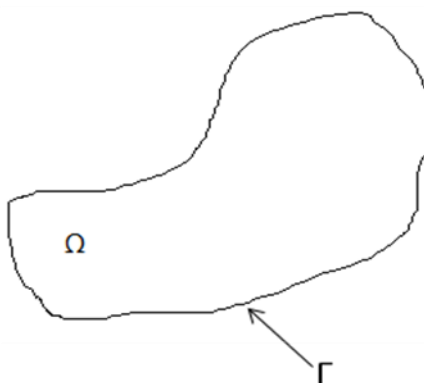


Figura 6 - Representação esquemática do domínio Ω do problema com fronteira Γ .

O Método dos Elementos Finitos é uma técnica de aproximação para descobrir funções-soluções. O método consiste em subdividir o domínio Ω em subdomínios, ou *elementos finitos*, como ilustrado na Figura 7. Estes elementos finitos são interconectados a um número finito de pontos, ou nós, ao longo de suas periferias. O conjunto de elementos finitos define o *problema do malhamento*. É importante notar que por ser arbitrária a subdivisão de Ω , não existe uma malha única para um dado problema.

Em cada elemento finito, o campo de deslocamentos e o campo de potencial elétrico são unicamente definidos por valores que eles assumem nos nós do elemento. Isto é alcançado através de um processo de *interpolação* ou *atribuição de pesos* em que as *funções de forma* são associadas com o elemento. Pela combinação, ou *montagem*, destas definições locais através de toda a malha,

obtém-se uma função teste para Ω que depende somente dos valores de u e φ nos nós e é seccionalmente definida para todos domínios elementares interconectados. Ao contrário do domínio Ω , estes domínios elementares podem ter uma forma geométrica simples e composição homogênea.

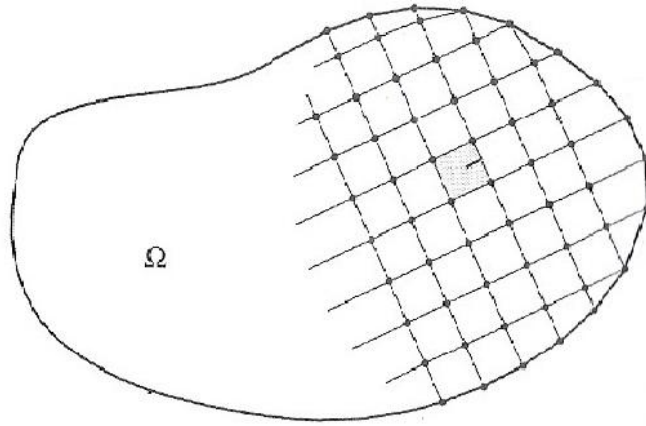


Figura 7 - Domínio Ω discretizado

3.2 - Definição das Equações do Problema

3.2.1 - Equações Constitutivas e de Equilíbrio

As relações constitutivas para meios piezelétricos devem ser derivadas em termos de seus potenciais termodinâmicos associados. Assumindo que a deformação, x , e o campo elétrico, E , são variáveis independentes, as equações básicas de estado para os efeitos piezelétricos diretos e inversos são:

$$\begin{aligned} X_{ij} &= c_{ijkl}^E x_{kl} - e_{kij} E_k \\ D_i &= e_{ikl} x_{kl} + \chi_{ij}^x E_j \end{aligned} \quad (41)$$

As quantidades c^E (rigidez elástica em um campo elétrico constante), e (coeficiente de tensão piezelétrica) e χ^x (suscetibilidade a uma deformação constante) são assumidas como constantes, o que é razoável para materiais piezelétricos submetidos a pequenas deformações e moderados campos elétricos. Além disso, nenhuma distinção é feita entre constantes isotérmicas e adiabáticas.

No domínio Ω , e em sua fronteira, Γ , (onde a normal é direcionada para fora do domínio) a relação dinâmica fundamental a seguir precisa ser verificada:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial r_j} \quad (42)$$

onde $\mathbf{u}$ é o vetor de deslocamentos, ρ a densidade de massa do material, t o tempo, $\mathbf{X}$ é o tensor de tensões, e $\mathbf{r} = \langle r_1 \ r_2 \ r_3 \rangle$ é um vetor unitário no sistema cartesiano de coordenadas.

Quando cargas microscópicas não estão presentes no meio, o teorema de Gauss impõe para o vetor de deslocamento elétrico, $\mathbf{D}$:

$$\frac{\partial D_i}{\partial r_i} = 0 \quad (43)$$

Considerando pequenas deformações, o vetor de deformação, $\mathbf{x}$, é escrito como:

$$x_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial r_l} + \frac{\partial u_l}{\partial r_k} \right) \quad (44)$$

Assumindo condições eletrostáticas, o potencial eletrostático, φ , é relacionado ao campo elétrico $\mathbf{E}$ por:

$$\mathbf{E} = - \text{grad } \varphi \quad (45)$$

ou, equivalentemente,

$$E_i = - \frac{\partial \varphi}{\partial r_i} \quad (46)$$

Usando as equações (42), (43) e (46) em combinação com a equação (41), temos:

$$\begin{cases} -\rho \omega^2 u_i = \frac{\partial}{\partial r_j} (c_{ijkl}^E x_{kl} - e_{kij} E_k) \\ \frac{\partial}{\partial r_j} (e_{ikl} x_{kl} + \chi_{ij}^x E_j) = 0 \end{cases} \quad (47)$$

3.2.2 - Condições de Contorno

Condições de contorno mecânicas e elétricas completam a definição do problema.

As condições de contorno mecânicas são as seguintes:

- Condição de Dirichlet para deslocamento de campo, $\mathbf{u}$, é dada por:

$$u_i = u_i^0 \quad (48)$$

onde $\mathbf{u}^0$ é um vetor conhecido. Por conveniência, nomeia-se o conjunto de superfícies submetidas a esta condição como S_u .

- A condição de Neumann no campo de tensões, $\mathbf{X}$, é dado por:

$$X_{ij} \cdot n_j = f_i^0 \quad (49)$$

onde $\mathbf{n}$ é o vetor normal a Γ , dirigido para fora, e $\mathbf{f}_i^0$ é um vetor conhecido. Por conveniência, nomeia-se o conjunto de superfícies submetidas a esta condição como S_x .

As condições de contorno elétricas são as seguintes:

- As condições para excitação do campo elétrico entre as superfícies do material piezelétrico que não são cobertas com um eletrodo e são, portanto, livres de cargas de superfície são dadas por:

$$D_i \cdot n_i = 0 \quad (50)$$

onde $\mathbf{n}$ é um vetor normal à superfície. Por conveniência, nomeia-se o conjunto de elementos de superfície submetidos a esta condição como S_σ . Note que com a condição (49), assume-se que o campo elétrico de fora Ω é negligenciável, o que é facilmente verificável para cerâmicas piezelétricas.

- Quando são consideradas as condições para o potencial e excitação do campo elétrico entre as superfícies do material piezelétrico que são cobertas com

eletrodos, assume-se que existam p eletrodos no sistema. O potencial de toda a superfície do p^{th} eletrodo é:

$$\varphi = \varphi_p \quad (51)$$

A carga no eletrodo é:

$$- \iint D_i n_i dS_p = Q_p \quad (52)$$

Em alguns casos, o potencial é utilizado, e em outros a carga é usada. No caso anterior, φ_p é conhecido e a equação (51) é usada para determinar Q_p . No último caso, Q_p é conhecido e a equação (50) é usada para determinar φ . Finalmente, para determinar a origem do potencial, é necessário impor a condição que o potencial em um dos eletrodos é zero ($\varphi_0 = 0$).

3.3 - Aplicação do Método dos Elementos Finitos

3.3.1 Acoplamento das equações

O domínio Ω é dividido em subdomínios Ω^e , ou elementos finitos (discretização), e o funcional Π pode ser escrito como:

$$\Pi^e = \frac{1}{2} U^{eX} (K_{uu}^e - \omega^2 M^e) U^e + U^{eX} K_{u\varphi}^e \Phi^e + \frac{1}{2} \varphi^{eX} K_{\varphi\varphi}^e \Phi^e - U^{eX} F^e + \sum_{p=0}^p \varphi_p Q_p \quad (53)$$

onde:

$$\begin{aligned} K_{uu}^e &= \iiint_{\Omega^e} B_u^{eX} c^E B_u^e d\Omega^e \\ M^e &= \iiint_{\Omega^e} \rho \omega^2 N^{eX} N^e d\Omega^e \\ K_{\varphi u}^e &= \iiint_{\Omega^e} B_u^{eX} e B_\varphi^e d\Omega^e \\ K_{\varphi\varphi}^e &= - \iiint_{\Omega^e} B_\varphi^{eX} \chi^x B_\varphi^e d\Omega^e \\ F^e &= \iint_{S_X^e} N^{eX} f dS_X^e \end{aligned} \quad (54)$$

e K_{uu}^e , $K_{\varphi u}^e$ e $K_{\varphi\varphi}^e$ são as matrizes elástica, piezelétrica e de suscetibilidade dielétrica, respectivamente, e M^e é a matriz de consistência de massa.

As matrizes em (54) devem ser rearranjadas para todo o domínio Ω por um processo chamado de acoplamento. Deste processo, obtemos as seguintes matrizes:

$$\begin{aligned}
 K_{uu} &= \sum_e K_{uu}^e \\
 M &= \sum_e M^e \\
 K_{\varphi u} &= \sum_e K_{\varphi u}^e \\
 K_{\varphi\varphi} &= \sum_e K_{\varphi\varphi}^e \\
 F &= \sum_e F^e
 \end{aligned} \tag{55}$$

Aplicando a condição estacionária para Π , obtém-se:

$$\begin{bmatrix} K_{uu} - \omega^2 M & K_{u\varphi} \\ K_{u\varphi}^t & K_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ -Q \end{bmatrix} \tag{56}$$

O vetor para cargas nodais, Q , é tal que para todos os nós i que pertencem a um eletrodo p com potencial φ_p , a soma das cargas Q_i é igual a φ_p . Para todos os outros nós j que não pertencem a um eletrodo, $Q_j = 0$.

3.3.2 Computação

A matriz (56) pode ser adaptada para uma variedade de diferentes análises, como a análise estática, modal, harmônica e transiente. As principais análises computacionais descritas neste trabalho são a modal e a harmônica, e serão mais exploradas no próximo tópico. Abaixo, pode-se ver o resultado da adaptação da matriz (56):

- Análise Estática:

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\varphi} \\ K_{u\varphi}^t & K_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ -Q \end{bmatrix}$$

- Análise Modal:

$$\begin{bmatrix} K_{uu} - \omega^2 M & K_{u\varphi} \\ K_{u\varphi}^t & K_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -Q \end{bmatrix}$$

- Análise Harmônica:

$$\begin{bmatrix} K_{uu} - \omega^2 M & K_{u\varphi} \\ K_{u\varphi}^t & K_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ -Q \end{bmatrix}$$

- Análise Transiente:

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{\Phi} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_0} \begin{bmatrix} K'_{uu} & K'_{u\varphi} \\ K'_{u\varphi}^t & K'_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\varphi} \\ K_{u\varphi}^t & K_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ -Q \end{bmatrix}$$

- Análise considerando o efeito giroscópico:

$$\left(\begin{bmatrix} K - \omega^2 M & P \\ P^* & -G \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} \frac{1}{Q_m} \left(K - 2\omega^2 \left(\frac{\Omega}{\omega} \right) Q_m \Phi M \right) & 0 \\ 0 & \tan \delta G \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \xi \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{q} \end{bmatrix}$$

onde K , M , G , P e Φ são matrizes de rigidez, massa, capacitância, acoplamento eletromecânico e rotação respectivamente; ξ , v e q são vetores de deslocamento, potencial elétrico e carga elétrica respectivamente; e Q_m e δ são fatores de qualidade mecânica e perda dielétrica, respectivamente.

Nessa equação pode ser visto que o termo $2\omega\Omega\Phi M$, que é relacionado ao efeito giroscópico, pode ser modelado como um amortecimento do sistema.

3.4 – Simulação no ANSYS

3.4.1 - Geração dos Sólidos

Anteriormente à fase de projeto do protótipo, é costumeiro fazer simulações computacionais a fim de se evitar gastos desnecessários de tempo e dinheiro com a construção de protótipos.

Com esse intuito foram feitas simulações do piezogiросcópico utilizando o software ANSYS para se obter parâmetros dinâmicos do funcionamento do giroscópico como modos de vibrar, frequências naturais e deslocamentos máximos.

Para melhor entendimento da modelagem utilizando o ANSYS, será feita uma descrição detalhada dos passos realizados.

O piezogiросcópico é modelado como uma viga engastada com quatro cerâmicas piezelétricas fixadas em lados opostos da viga, duas a duas. Essas cerâmicas são responsáveis pela vibração primária no piezogiросcópico, que aumenta o efeito giroscópico do mesmo, e o sensoramento da vibração para determinação da velocidade de rotação.

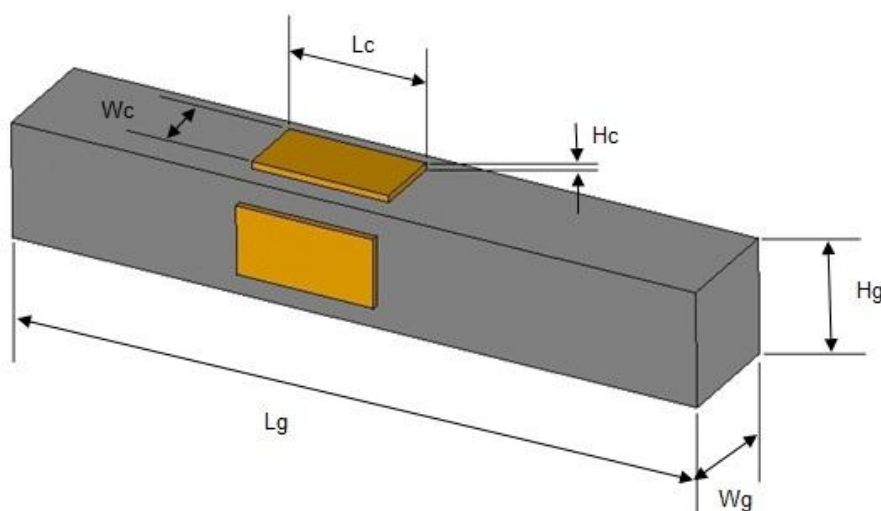


Figura 8 - Esboço do piezogiросcópico modelado no ANSYS.

Na Figura 8 W_g e W_c são as espessuras da viga e da cerâmica piezoelétrica respectivamente. L_c é o comprimento da cerâmica e L_g da viga e H_c e H_g como altura da cerâmica e da viga respectivamente.

Primeiramente é necessário criar os sólidos que serão utilizados na modelagem do piezogiросcópico. O sólido que será utilizado como a estrutura principal do piezogiросcópico é um paralelepípedo com seção transversal quadrada de 5 x 5 mm e comprimento de 30 mm. Além disso, devem ser criados mais quatro paralelepípedos que serão as cerâmicas piezelétricas, com dimensões 2 x 0,4 x 4 mm (largura, altura, comprimento). Para isso, no menu principal do ANSYS, deve-se realizar os seguintes passos: **Preprocessor > Modeling > Create > Volumes >**

Block > By 2 Corners & Z e inserir as coordenadas X e Y do canto do bloco e suas dimensões, nesse caso tem-se: **WPX = -0.0015, WPY = -0.0015, Width = 0.003, Height = 0.003, Depth = 0.030**. Dessa forma o paralelepípedo é criado com o centro da seção transversal na origem e comprimento começando em Z igual a zero. Vale ressaltar que todas as grandezas serão utilizadas no SI, portanto 5 mm = 0,005 m. Posteriormente cria-se os outros quatro paralelepípedos para as cerâmicas piezelétricas com os mesmo passos acima. Como dessa forma os blocos são criados sempre com a coordenada Z igual a zero, é necessário mover as cerâmicas para a posição desejada. Para isso, utiliza-se **Preprocessor > Modeling > Move / Modify > Volumes** e entra-se com os valores dos deslocamentos requeridos. Nesse caso, será feito um deslocamento de 10 mm na direção Z (dado que as cerâmicas já foram criadas no centro do giroscópio, caso contrário devem ser feitos deslocamentos em X e Y também). O próximo passo é fixar os sólidos uns aos outros, para o qual utiliza-se os comandos **Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Glue > Volumes** e seleciona-se todos os volumes. Para melhor visualização as cores dos objetos podem ser alteradas fazendo **Menu > PlotCtrls > Style > Colors > Picked Entity Colors** e selecionar **Volumes** e a cor que se deseja utilizar no sólido e depois selecionar a quais sólidos deve ser aplicada essa cor.

O resultado dos passos supracitados é mostrado na Figura 9.

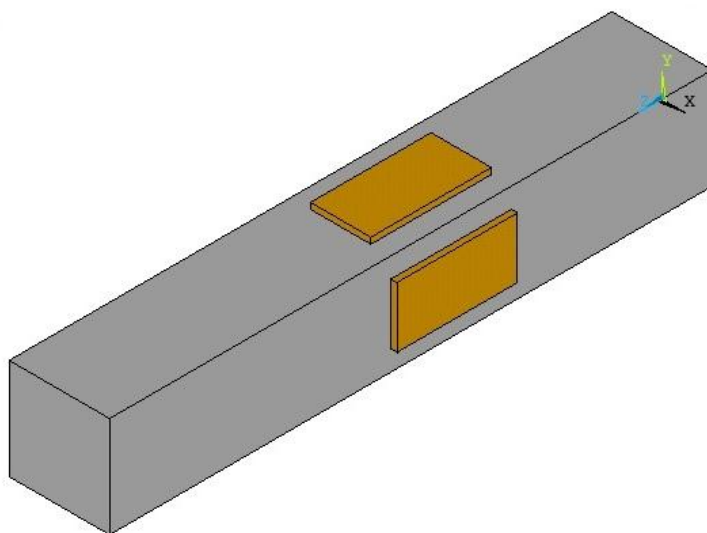
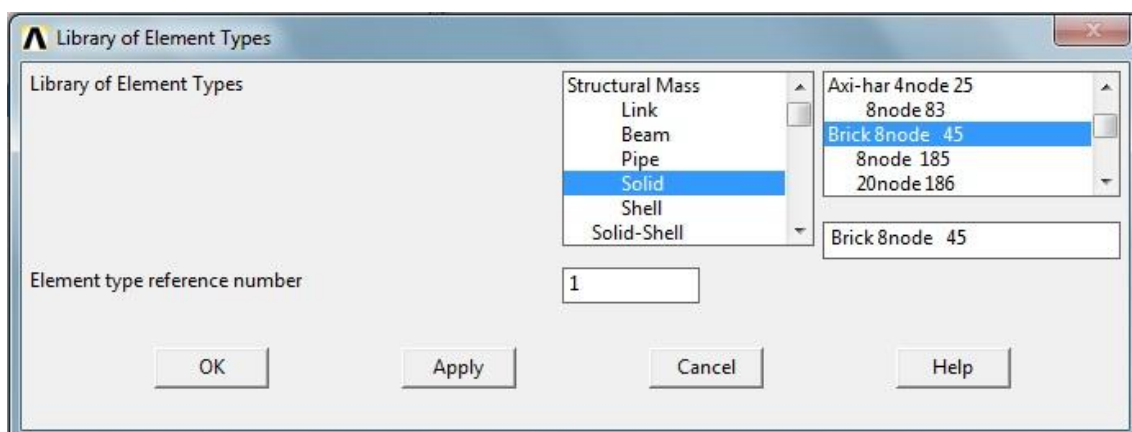


Figura 9 - Imagem lateral do Piezogirosópio gerado em ANSYS (a).

3.4.2 – Geração da malha

Após a criação dos sólidos, é necessário que se faça a discretização do modelo para que seja possível fazer a simulação.

O primeiro passo a ser tomado é a definição dos tipos de elemento que serão utilizados para que o software possa saber o comportamento dos elementos sob as condições que serão aplicadas. Utiliza-se então **Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete** e seleciona-se os materiais. Serão utilizados aqui o elemento SOLID 45 para o giroscópio e SOLID 5 para as cerâmicas piezelétricas. Na Figura 10 são mostradas a seleção dos tipos de elemento.



Seleção do sólido 45 (b).

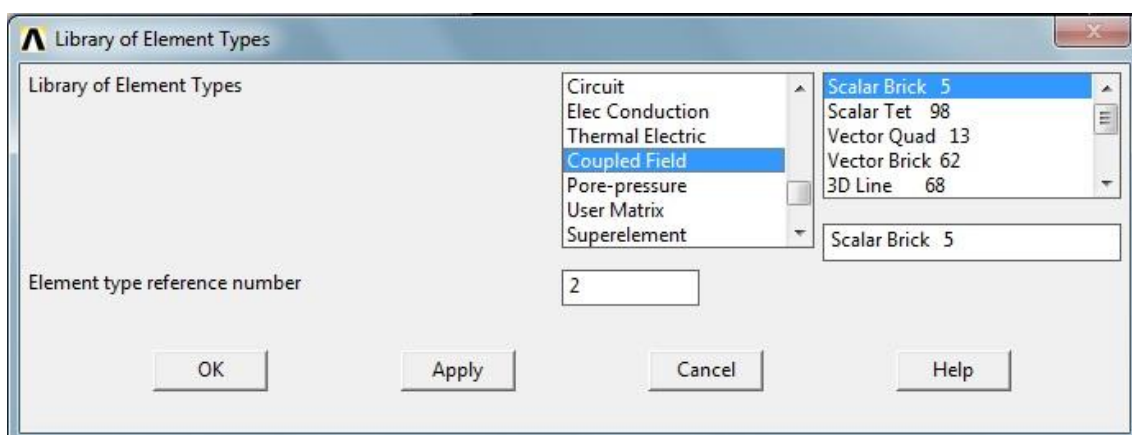


Figura 10 - Seleção do sólido 5 (a).

Após a seleção dos tipos de materiais que serão utilizados é necessário definir as propriedades de cada material. Para isso utiliza-se **Preprocessor > Material Props > Material Models > Material > New Model** e depois seleciona-se as propriedade que deseja-se atribuir a cada material. Na Figura 11 são mostradas essas propriedades, sendo que o modelo 1 é do corpo do giroscópio e o modelo 2 das cerâmicas piezelétricas.

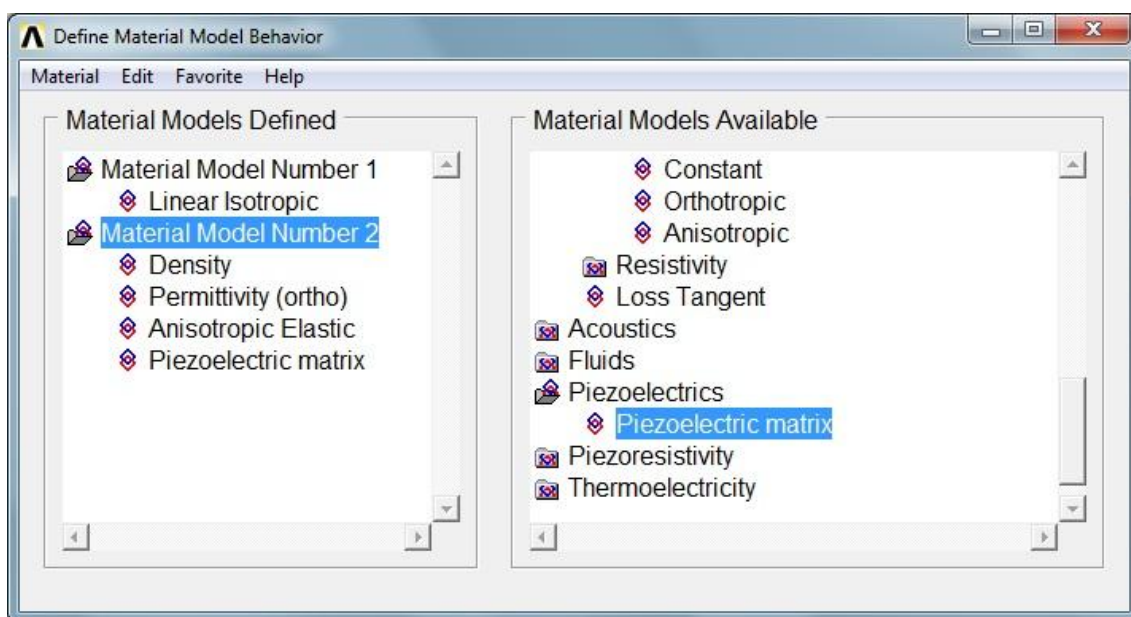


Figura 11 - Propriedades a serem determinadas.

Nas Figura 12 a Figura 16 são mostrados os valores utilizados para os materiais utilizados.

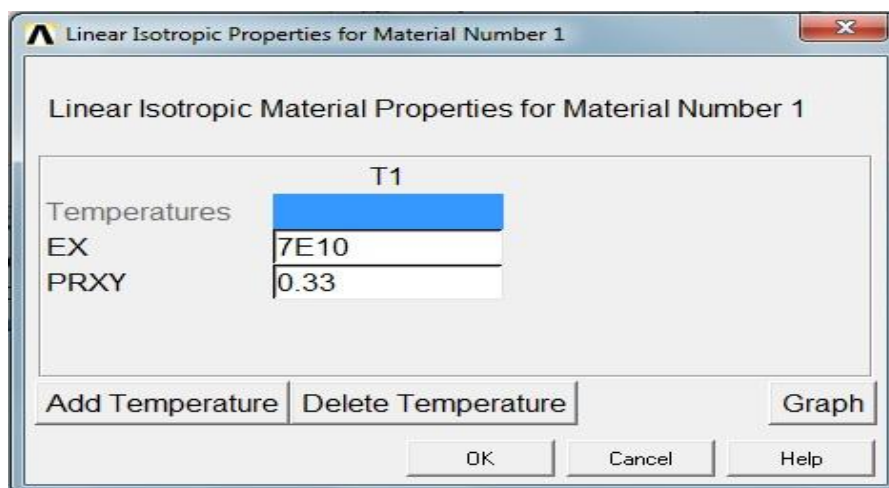
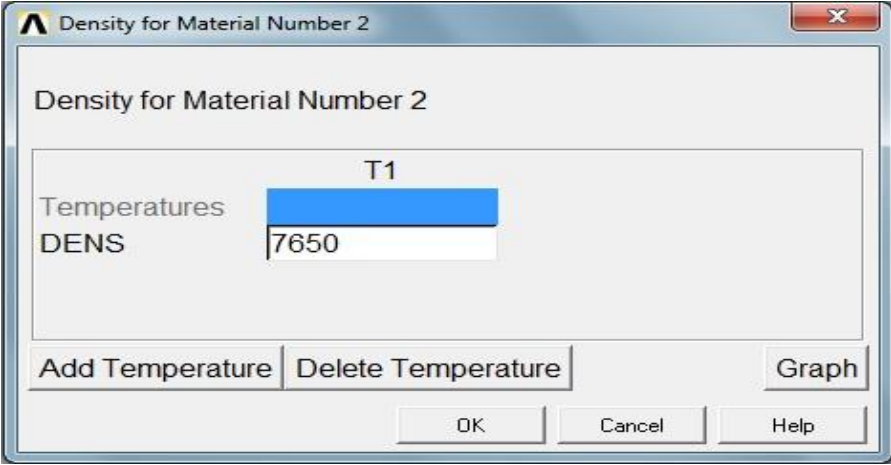
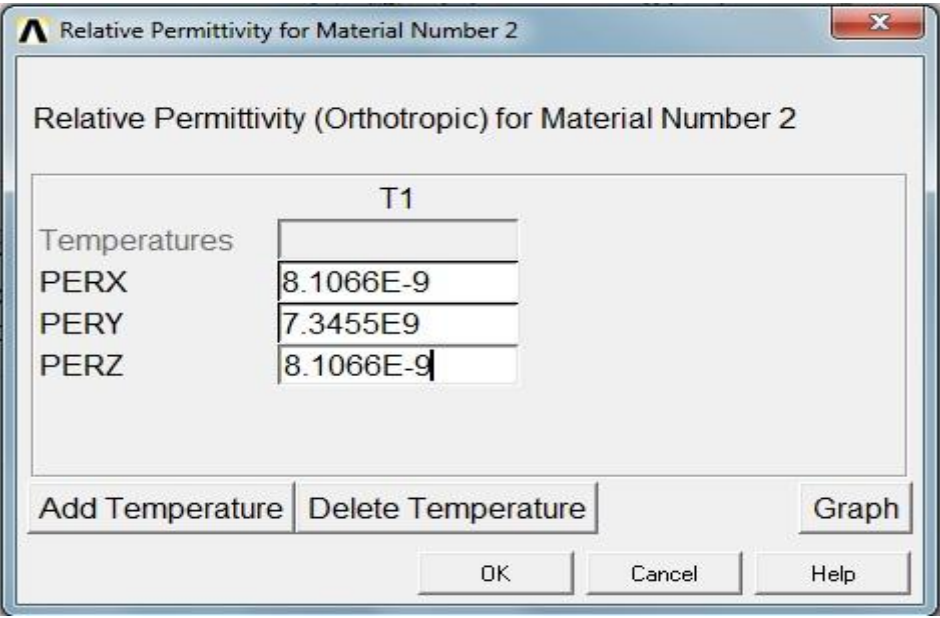


Figura 12 - Valores de propriedades para o alumínio (material 1).



Temperatures	DENS
T1	7650

Figura 13 - Densidade da piezocerâmica.



Temperatures	PERX	PERY	PERZ
T1	8.1066E-9	7.3455E9	8.1066E-9

Figura 14 - Permissividade cerâmica.

Anisotropic Elasticity for Material Number 2

Anisotropic Elastic Matrix Options Stiffness form

Temperature	T1
D11	1.25E11
D12	7.52E10
D13	7.54E10
D14	0
D15	0
D16	0
D22	1.11E11
D23	7.52E10
D24	0
D25	0
D26	0
D33	1.25E11
D34	0
D35	0
D36	0
D44	2.11E10
D45	0
D46	0
D55	2.11E10
D56	0
D66	2.48E10

Figura 15 - Coeficiente de elasticidade da piezocerâmica.

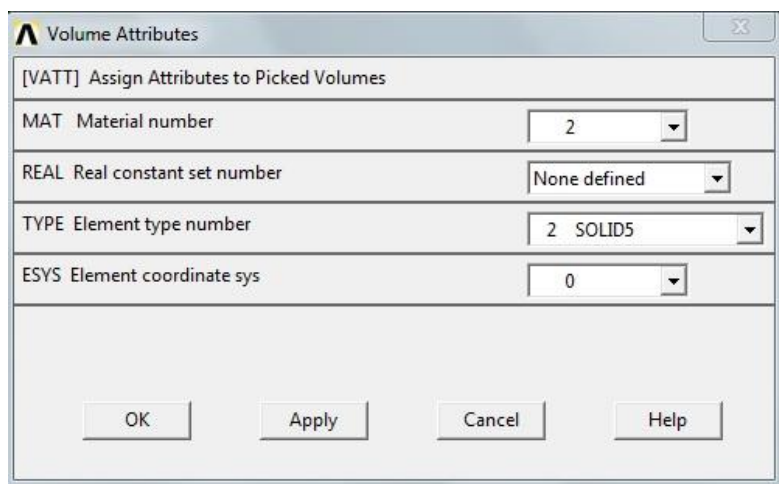
Piezoelectric Matrix for Material Number 2

Piezoelectric Matrix Options Piezoelectric stress matrix [e]

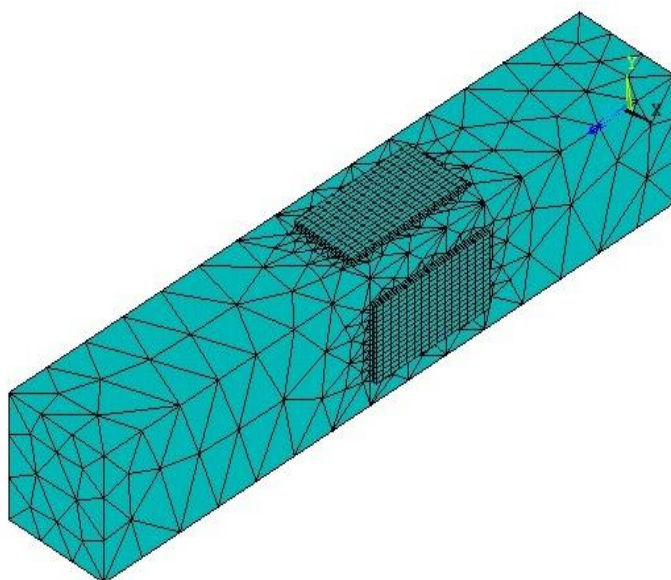
	X	Y	Z
X	0	-5.4	0
Y	0	15.8	0
Z	0	-5.4	0
XY	12.3	0	0
YZ	0	0	12.3
XZ	0	0	0

Figura 16 - Matriz piezelétrica da piezocerâmica.

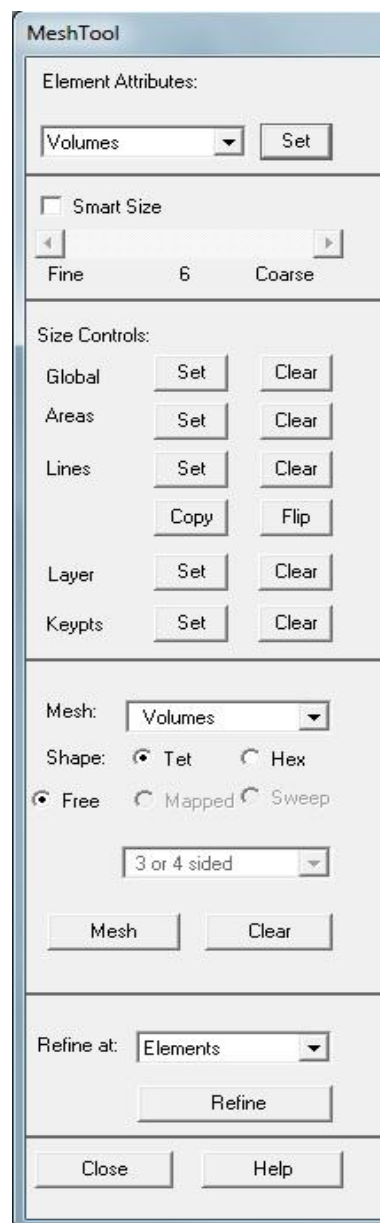
Após a definição das propriedades dos materiais, é necessário determinar a quais tipos de materiais pertence cada propriedade. Para isso é necessário fazer **Preprocessor > Meshing > MeshTool > Element Attributes > Volumes > Set** e escolher o sólido e o tipo de elemento que ele representa como mostrado na **Error! Reference source not found..**



Escolha sólido-material (a)



Sólidos discretizados (c)



Mesh Tool (b)

Figura 17: Malhamento da Geometria.

Na **Error! Reference source not found.** pode-se ver como fica a malha do modelo sólido. Com isso a discretização do piezogirosópio está completa.

3.4.3 – Análises

As primeiras análises realizadas, tanto modal quanto harmônica, não contemplam o efeito de Coriolis. Dessa forma obtêm-se algumas análises efetuadas muito mais rapidamente além dos resultados preliminares poderem ajudar a melhorar o projeto sem a necessidade de demoradas simulações.

3.4.4 – Análise Modal

Para se obter as frequências naturais de vibração e os modos de vibrar do conjunto é necessário fazer uma análise modal do sistema. Para isso faz-se **Preprocessor > Loads > Analysis > Modal**. Após esse procedimento é necessário definir as condições de contorno a quais está submetido o piezogirosópio. Primeiramente defini-se que o giroscópio está engastado na face onde a coordenada Z é igual a zero. Para isso utilize-se **Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas** e escolhe-se a face desejada e depois **All DOF** para que seja definido um engaste.

Após essa etapa deve-se curto circuitar os eletrodos das cerâmicas piezelétricas para que se obtenha as frequências naturais. Para isso faz-se **Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Electric > Boundary > Voltage > On Areas** e selecionar as áreas que devem ser aterradas e aplicar a tensão de zero volts.

Posteriormente deve-se determinar as condições da análise modal que será realizada. Serão extraídos os 10 primeiros modos de vibrar do piezogirosópio nesse trabalho. Para isso deve ser feito, **Preprocessor > Loads > Analysis Type > Analysis Options** e selecionar “Block Lanczos”. Deve-se também determinar o número de modos a serem extraídos e o intervalo de frequências que serão varridas para se determinar as frequências naturais, como é mostrado nas Figura 17 e Figura 18.

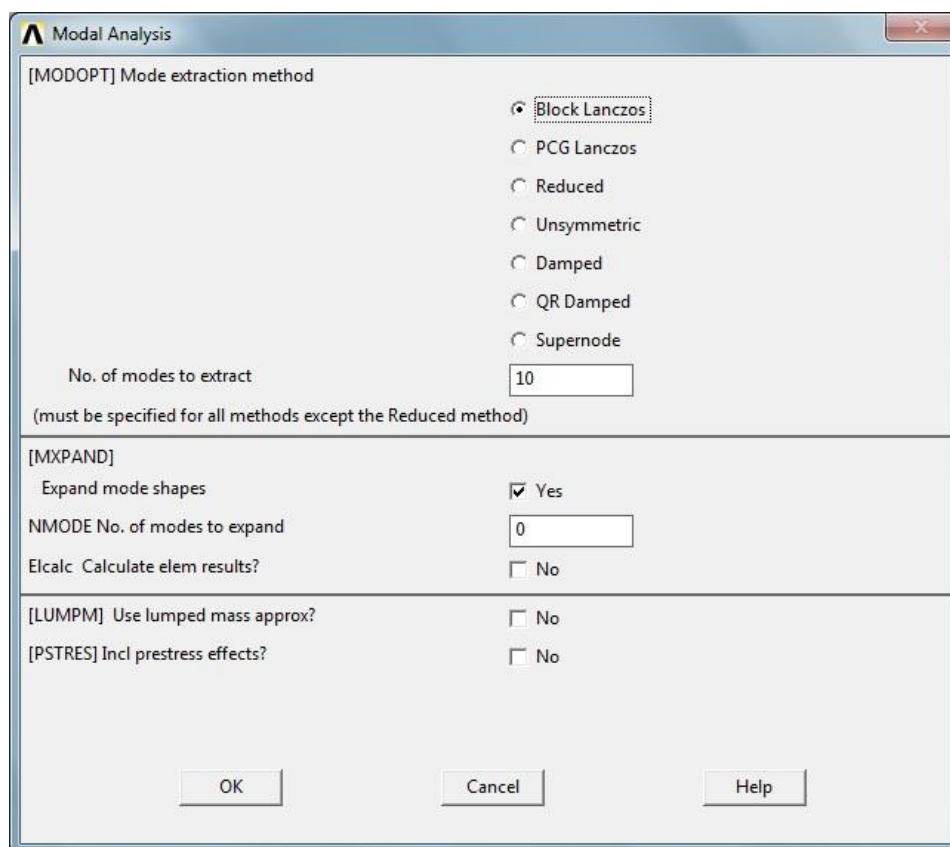


Figura 17 - Número de modos de vibrar a serem extraídos.

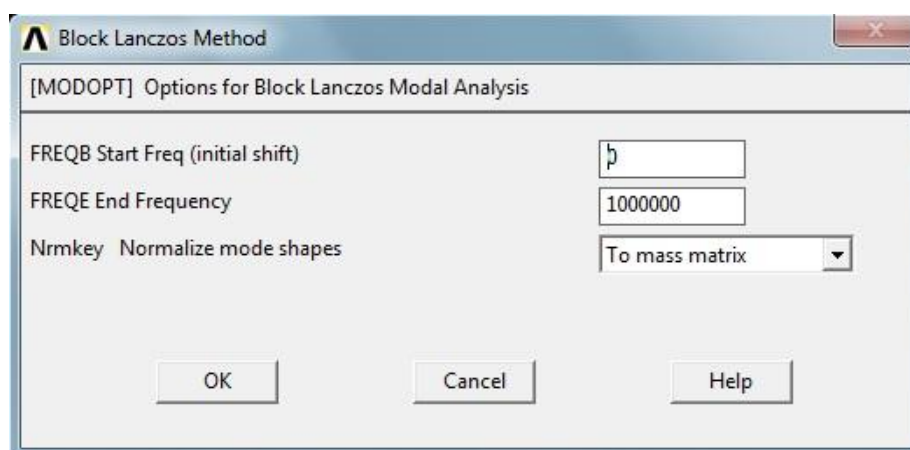


Figura 18 - Frequências a serem varridas.

Nota-se que nessa análise as frequências a serem varridas variam de zero a 1 MHz.

Por fim, para que seja realizada a análise dos sólidos faz-se, **Solution > Solve > Current LS**.

Depois que a solução for concluída deve-se verificar quais são as frequências naturais de vibração em **General Postproc > Results Summary**. Os resultados obtidos estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1 - Modos de vibrar e frequências naturais

Modo de Vibrar	Frequência
1	29,176 kHz
2	29,468 kHz
3	75,570 kHz
4	148,80 kHz
5	171,90 kHz
6	172,12 kHz
7	328,27 kHz
8	456,60 kHz
9	456,72 kHz
10	504,52 kHz

Ainda pode-se observar os modos deformados da estrutura. As estruturas deformadas dos dois primeiros modos de vibrar podem ser observadas nas **Error! Reference source not found.** e Figura .

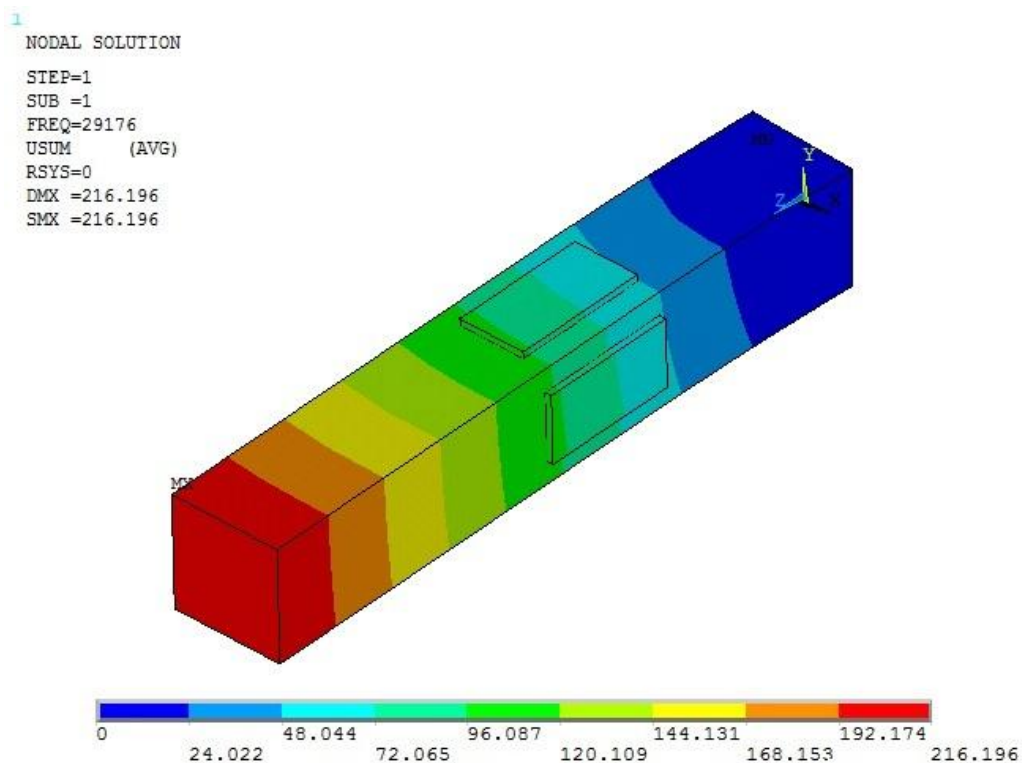


Figura 19 - Forma deformada do primeiro modo de vibrar.

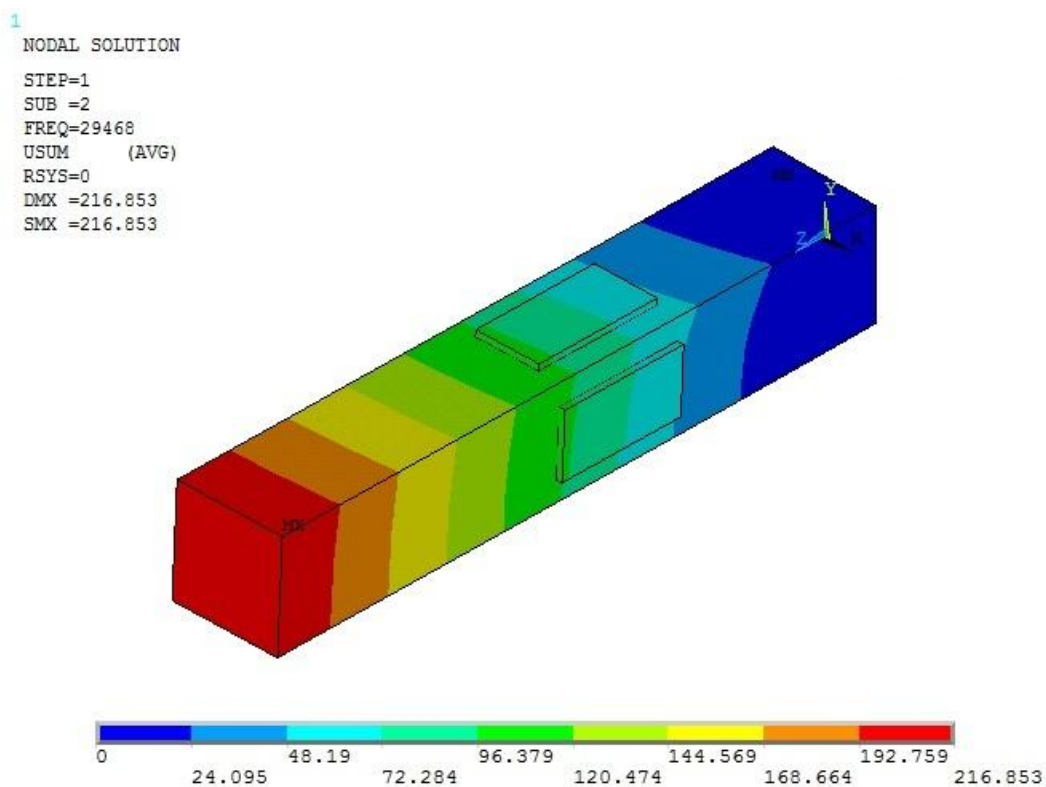


Figura 20 - Forma deformada do segundo modo de vibrar.

3.4.5 – Análise Harmônica

Depois de feita a análise modal e obtidas as frequências naturais de vibração do piezogiroscópio, será feita uma análise harmônica para a verificação do comportamento dinâmico do giroscópio quando submetido a uma rotação em torno do seu eixo.

Na análise modal as cerâmicas piezelétricas são curto circuitadas. No caso da análise harmônica, duas cerâmicas serão excitadas com o fim de aumentar o efeito giroscópico como previamente explicado e será estudado o efeito que isso causa nas outras cerâmicas que funcionarão como sensores.

Primeiramente será imposta uma rotação no eixo Z do piezogiroscópio da figura. Para isso deve ser feito **Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Angular Velocity > Global** e coloca-se o valor desejado da velocidade angular a ser imposta. Nesse caso uma rotação de 100 rad/s será imposta no eixo Z como mostrado na Figura 19.

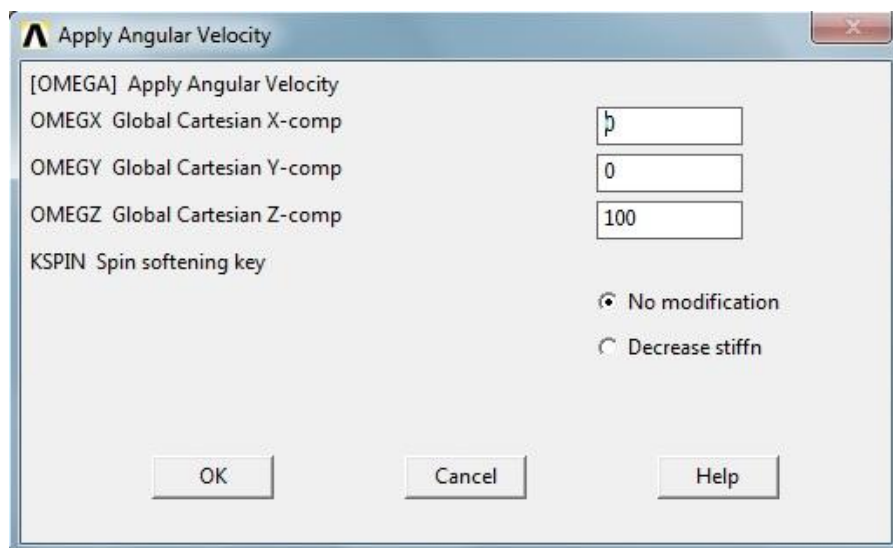


Figura 19 - Definição da velocidade angular.

Com a velocidade angular imposta, deve-se impor a tensão elétrica às piezocerâmicas de excitação da estrutura. Aqui será imposta uma tensão que varia de forma cossenoidal entre as faces superiores das piezocerâmicas de excitação e as faces que estão coladas na barra, as quais serão aterradas (inclusive das

cerâmicas que serão sensores). A tensão aplicada nas cerâmicas de excitação é definida como $V = 40 \cdot \sin(\omega t)$.

Para as tensões fixas deve ser feito **Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Electric > Boundary > Voltage > On Areas** e seleciona-se a área em que se quer que a tensão seja aplicada e nesse caso entra-se com a amplitude da tensão senoidal, 40 V nesse caso.

As condições previamente definidas devem ser mantidas, como a condição de engaste de uma das faces e a malha da estrutura.

Por fim deve-se definir a análise harmônica que será utilizada agora para a análise dinâmica. Para isso deve ser feito **Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis** e selecionar *Harmonic*.

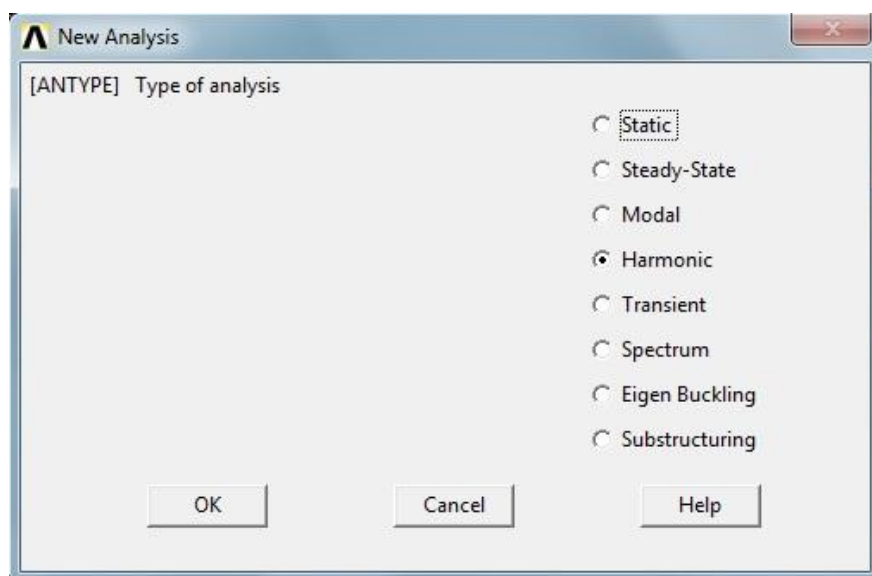


Figura 20 - Escolha análise harmônica.

Depois deve-se definir os parâmetros da análise. Para isso faz-se **Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq and Substps** e nesse caso as frequências a serem varridas irão variar de 100 a 175 kHz, passando pelas quarta, quinta e sexta frequências de ressonância. Essa faixa de frequência foi escolhida baseado em uma simulação preliminar que mostrou que nessa faixa os valores eram mais expressivos. Para se economizar tempo computacional, a faixa de frequências para análise foi restringida então a esses valores.

Para que se tivesse um resultado mais realista, os graus de liberdade da face livre da cerâmica piezelétrica foram acoplados, para que todos tivessem o mesmo valor de potencial elétrico. Para isso foi feito **Preprocessor > Coupling / Ceqn > Couple DOFs** e seleccionar os nós que devem ser acoplados.

Para se fazer a análise, **Solution > Solve > Current LS**.

Os resultados para o potencial elétrico nas faces livres das cerâmicas de sensoramento podem ser vistos nas Figura 21 e Figura 22.

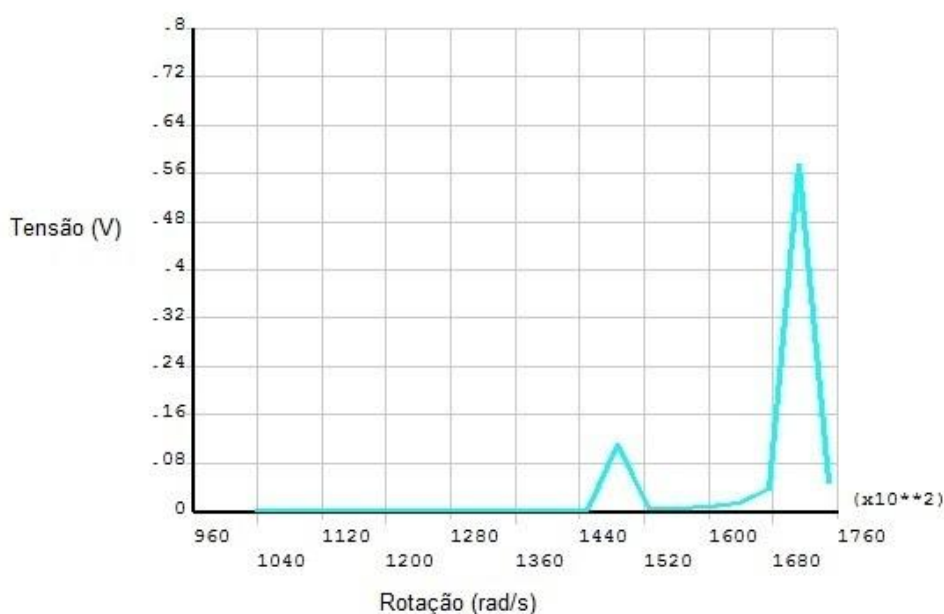


Figura 21 - Tensão por frequência com velocidade angular igual a 500 rad/s.

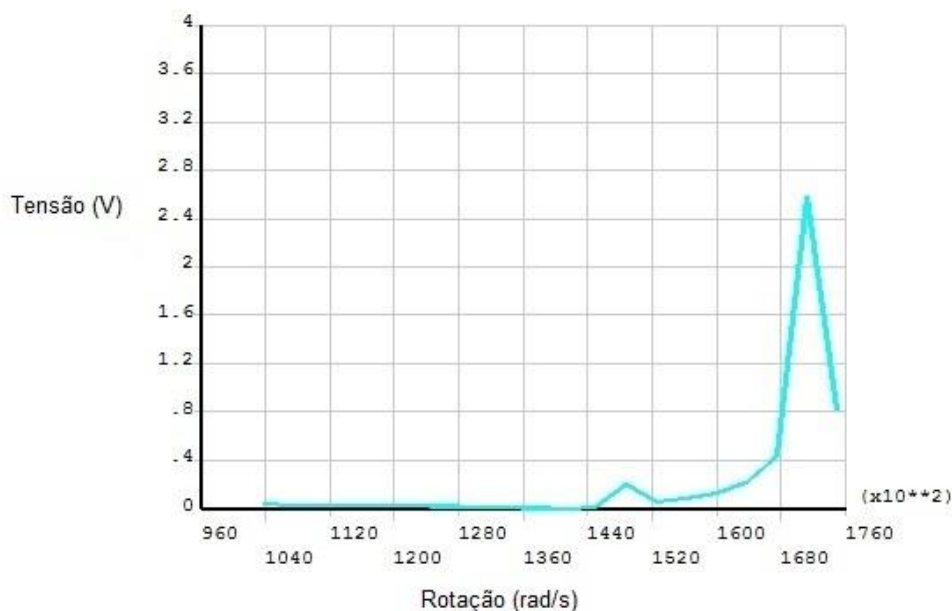


Figura 22 - Tensão por frequência com velocidade angular igual a 1000 rad/s.

O resultado está de acordo com o que é esperado, pois com uma variação apenas da velocidade angular, obteve-se uma diferença de potencial elétrico nas faces livres das cerâmicas piezelétricas de sensoriamento.

3.4.6 – Reprojeto

Após a simulação inicial, foi feito um reprojeto para melhor desempenho do giroscópio.

Para que a medição da tensão elétrica nas cerâmicas de sensoriamento seja facilmente aferida, é aconselhável que essa seja a mais alta possível. Quanto maior for a variação de tensão com a variação de velocidade angular mais precisa será a medição e, portanto, a qualidade do piezogiroscópio será maior.

A cerâmica piezelétrica responde com um campo elétrico quando é deformada e quanto maior for a deformação, maior será a tensão elétrica na face da

cerâmica. Dito isso, fica claro que uma maior amplitude de deformação é o objetivo do reprojeto.

O primeiro fator que foi levado em conta, foi a espessura do giroscópio. A espessura original escolhida foi de 5 mm. Quanto menor for a espessura, maior será a amplitude da deformação e portanto melhor o sinal da cerâmica piezelétrica. Há de se observar, porém, que a espessura não pode ser diminuída o quanto se queira, pois isso acarretaria em grande dificuldade de obtenção do protótipo por métodos convencionais de usinagem. Fazendo-se um balanço desses dois pontos chegou-se em um valor de 3 mm de espessura. Para facilitar a usinagem, passou-se a usar uma seção quadrada de 3 mm de lado.

O segundo fator a ser considerado foi a cerâmica de sensoriamento, que se encontra na “lateral” do giroscópio. Essa cerâmicas, a princípio, possuíam 2x4x0,4 mm de tamanho, assim como as outras. Como a influência desses elementos é grande, foi feita uma análise para otimização de suas dimensões. A espessura era o único fator que tinha grande importância, portanto foi reduzida a metade, passando a ter 0,2 mm de espessura. As únicas cerâmicas disponíveis para construção do protótipo possuíam essas medidas e então não era possível fazer uma nova variação.

Por último, foi avaliada a influência da posição das cerâmicas sobre a viga. Como dito anteriormente, o efeito giroscópico é afetado diretamente pela vibração induzida pelas cerâmicas de excitação. Então é necessário posicionar as mesmas de forma que causem maior deformação com a mesma tensão aplicada. Com as cerâmicas de excitação mais perto da base engastada do giroscópio a deformação causada era maior e com as cerâmicas de sensoriamento mais próximas da base a deformação sentida nelas também é maior.

3.4.7 - Considerações sobre a simulação no ANSYS

Algumas considerações devem ser feitas sobre a simulação feita com o ANSYS.

O funcionamento desse tipo de giroscópio é baseado no efeito da força de Coriolis. As cerâmicas de excitação causam uma vibração no giroscópio e com a

rotação do giroscópio surge uma vibração secundária, que é medida com as cerâmicas de sensoriamento, devido às forças de Coriolis.

A força de Coriolis pode ser representada na sua forma vetorial como:

$$\vec{F}_C = 2m\omega(\vec{v} \times \vec{e}_{axe})$$

Sendo $\vec{e}_{axe}$ o vetor unitário paralelo ao eixo de rotação.

Dado que o princípio de funcionamento do giroscópio passa pela força de Coriolis, essa deve ser levada em conta na hora de ser feita a simulação no software de elementos finitos. Os resultados anteriores não são inválidos, mas com a ativação do efeito de Coriolis os dados obtidos serão mais precisos.

O efeito de Coriolis em elementos rotativos não é levado em conta por *default* no ANSYS. Esse efeito deve ser ativado em **Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Angular Veloc > Coriolis**. Nessa seleção a janela na Figura 23 deve aparecer.

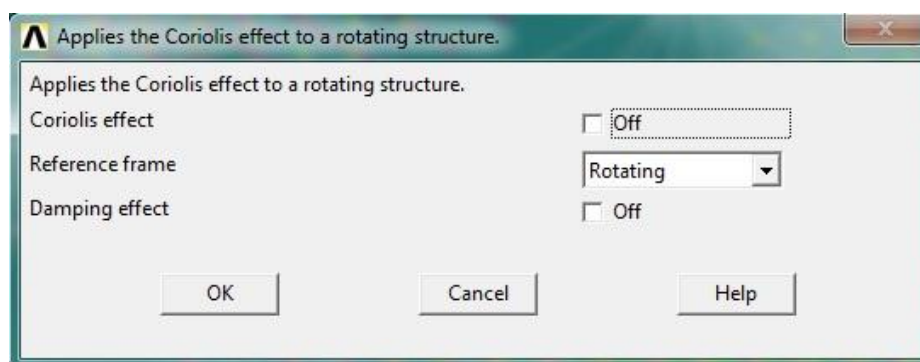


Figura 23 – Ativação do efeito de Coriolis.

Nesse caso deve-se escolher entre *Rotating* ou *Stationary Reference Frame* e *Coriolis effect* e *Damping effect* ativados ou não.

Neste trabalho escolhe-se *Rotating Reference Frame* pois o modelo inteiro da estrutura está girando. Ainda deve-se ativar a opção de *Coriolis effect* para que a força de Coriolis seja levada em conta. Quando a estrutura sendo simulada é mais complexa e existe um eixo girante sendo suportado por uma estrutura fixa, deve-se escolher a opção de *Stationary Reference Frame*. A opção de *Damping effect* só pode ser escolhida no caso de também ser utilizada a opção de *Stationary Reference Frame*.

Com a força de Coriolis ativada no ANSYS, pode-se avaliar se o efeito giroscópico está sendo detectado nas simulações efetuadas.

O efeito giroscópico não pode ser medido de nenhuma forma direta, portanto deve-se utilizar algum modo alternativo que permita verificar de maneira confiável sua presença ou ausência.

Sabendo-se disso, uma forma de se observar o efeito giroscópico é através dos modos de vibrar do giroscópio. Os modos de vibrar sem rotação são calculados facilmente, mas quando se aplica uma velocidade angular à estrutura do giroscópio, deve ser observada uma variação nas frequências dos modos de vibrar. Essas variações foram observadas em duas análises modais, uma sem rotação e outra com rotação de 1000 rad/s, como mostrado na Tabela 2. Essa rotação é extremamente alta para um giroscópio, porém foi utilizada aqui apenas para demonstrar o princípio do efeito giroscópico.

Tabela 2 - Valores de modos de vibrar com diferentes rotações.

ROT = 1000 rad/s			ROT = 0 rad/s		
SET	FREQ (Damped)	FREQ (Undamped)	SET	FREQ (Damped)	FREQ (Undamped)
1	-0.12441 +3036j	3168.3	1	-0.11588 +3168.3j	3168.3
	-0.12441 -3036j			-0.11588 -3168.3j	
2	-0.14294 +3357.2j	3217.5	2	-0.15148 +3217.5j	3217.5
	-0.14294 -3357.2j			-0.15148 -3217.5j	
3	-0.93229 +19681j	19797	3	-0.95342 +19797j	19797
	-0.93229 -19681j			-0.95342 -19797j	
4	-0.93578 +19997j	19879	4	-0.91465 +19879j	19879
	-0.93578 -19997j			-0.91465 -19879j	
5	-17.511 +33838j	33838	5	-17.511 +33838j	33838
	-17.511 -33838j			-17.511 -33838j	
6	-9.4833 +43407	43407	6	-9.4833 +43407j	43407
	-9.4833 -43407			-9.4833 -43407j	
7	-6.1447 +48508	48574	7	-6.0716 +48574j	48574
	-6.1447 -48508			-6.0716 -48574j	
8	-6.5010 +48863	48797	8	-6.5739 +48797j	48797
	-6.5010 -48863			-6.5739 -48797j	
9	-34.938 +87814j	87838	9	-34.681 +87838j	87838
	-34.938 -87814j			-34.681 -87838j	
10	-42.568 +88515j	88491	10	-42.824 +88491j	88491
	-42.568 -88515j			-42.824 -88491j	

No ANSYS ainda existe uma ferramenta chamada Diagrama de Campbell. Com essa ferramenta é possível que seja visualizada graficamente a evolução das frequências com a velocidade rotacional, verificar a estabilidade e rotação (para

frente ou para trás) de cada modo e determinar as velocidades críticas; esse diagrama pode ser visualizado na Figura 24.

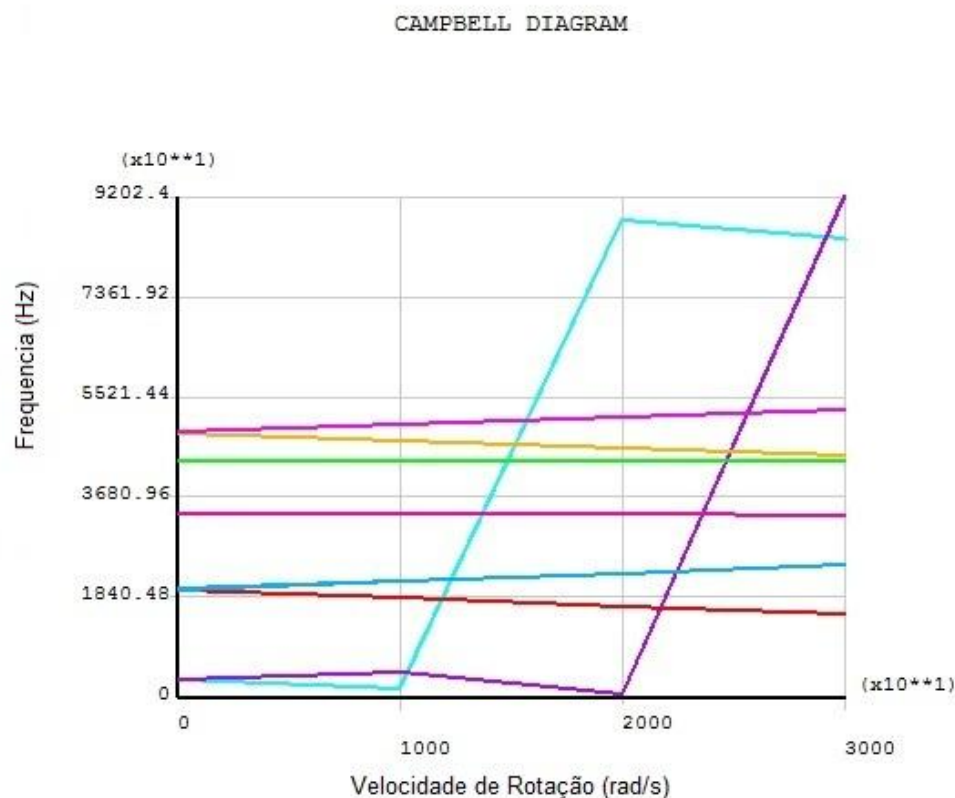


Figura 24 – Diagrama de Campbell

3.4.8 – Resultados das simulações

A simulação com software de método de elementos finitos é uma ferramenta importante no projeto do piezogiroscópio. Os resultados das simulações ajudam a entender o funcionamento do equipamento e a prever o comportamento do giroscópio em operação.

O software não é perfeito, assim como o seu operador. Isso quer dizer que existem funcionalidades que podem não existir no programa e que são necessárias para uma boa modelagem. Outro ponto importante é que mesmo que essas funcionalidades existam, os softwares mais conhecidos de elementos finitos são extremamente complexos e pode não ser trivial ou mesmo chegar a ser muito difícil encontrar, ativar e configurar essas funcionalidades mesmo com os manuais disponíveis.

A primeira verificação a ser feita diz respeito à tensão aplicada às cerâmicas de excitação. Como se tem uma cerâmica em cima e outra embaixo da viga utilizada no piezogiroscópio, a excitação das duas com a mesma tensão pode causar um efeito indesejado, com uma cerâmica praticamente eliminando a ação da outra (Figura 25).

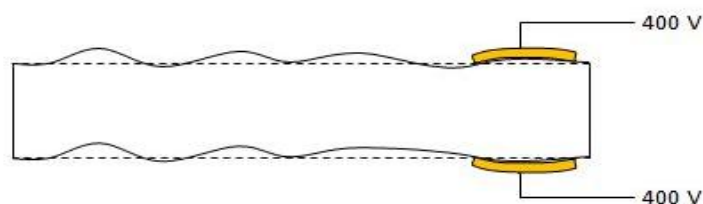


Figura 25 – Giroscópio deformado com excitação das cerâmicas em concordância de fase e polarização invertida.

Visto isso, é fácil perceber que uma das cerâmicas precisa estar com a excitação defasada com relação à outra. Pode-se notar também que para que os efeitos de vibração das duas cerâmicas se somem, a defasagem entre elas deve ser de 180° , ou seja, aplicação de 400 V em uma e de -400 V na segunda, por exemplo (Figura 26).

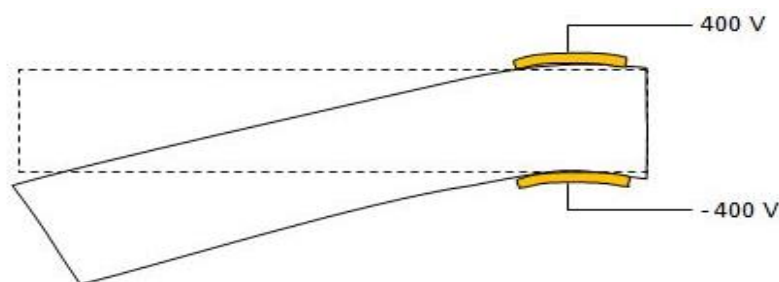


Figura 26 - Giroscópio deformado com excitação das cerâmicas em oposição de fase e polarização invertida.

Na Figura 27 pode-se ver todas as configurações possíveis entre polarização de cerâmicas, tensão elétrica aplicada e deformações das cerâmicas.

Dentre os quatro casos mostrados, os casos que são interessantes são os em que a deformação nas duas cerâmicas é oposta uma da outra, ou seja, quando uma se comprime a outra se contrai.

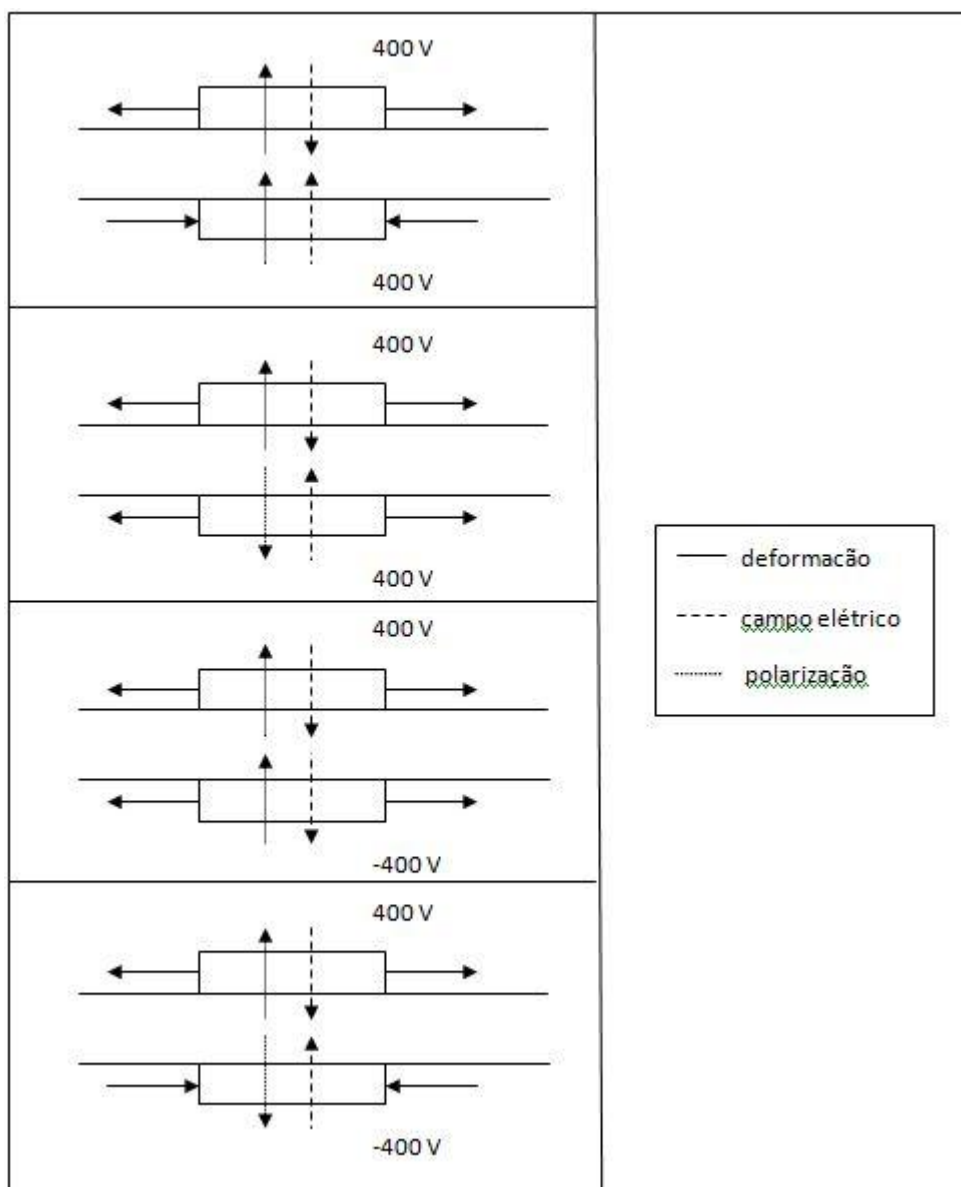


Figura 27 - Deformação das cerâmicas devido a polarização das cerâmicas e campo elétrico aplicado.

Para comprovar esse fato, foram realizadas duas análises harmônicas varrendo frequências entre 0 e 500 kHz, com excitações em concordância e em oposição de fase. As análises podem ser vistas na Figura 28.

Nessa figura nota-se que quando se aplica tensões em oposição de fase o giroscópio fica consideravelmente mais sensível, podendo-se assim obter uma resposta mais significativa com esse modelo. Esse fato pode ser observado quando verificados os valores de tensão nos dois modelos; os valores são consideravelmente mais elevados na simulação que utiliza 400 e -400 volts e a polarização das cerâmicas invertidas.

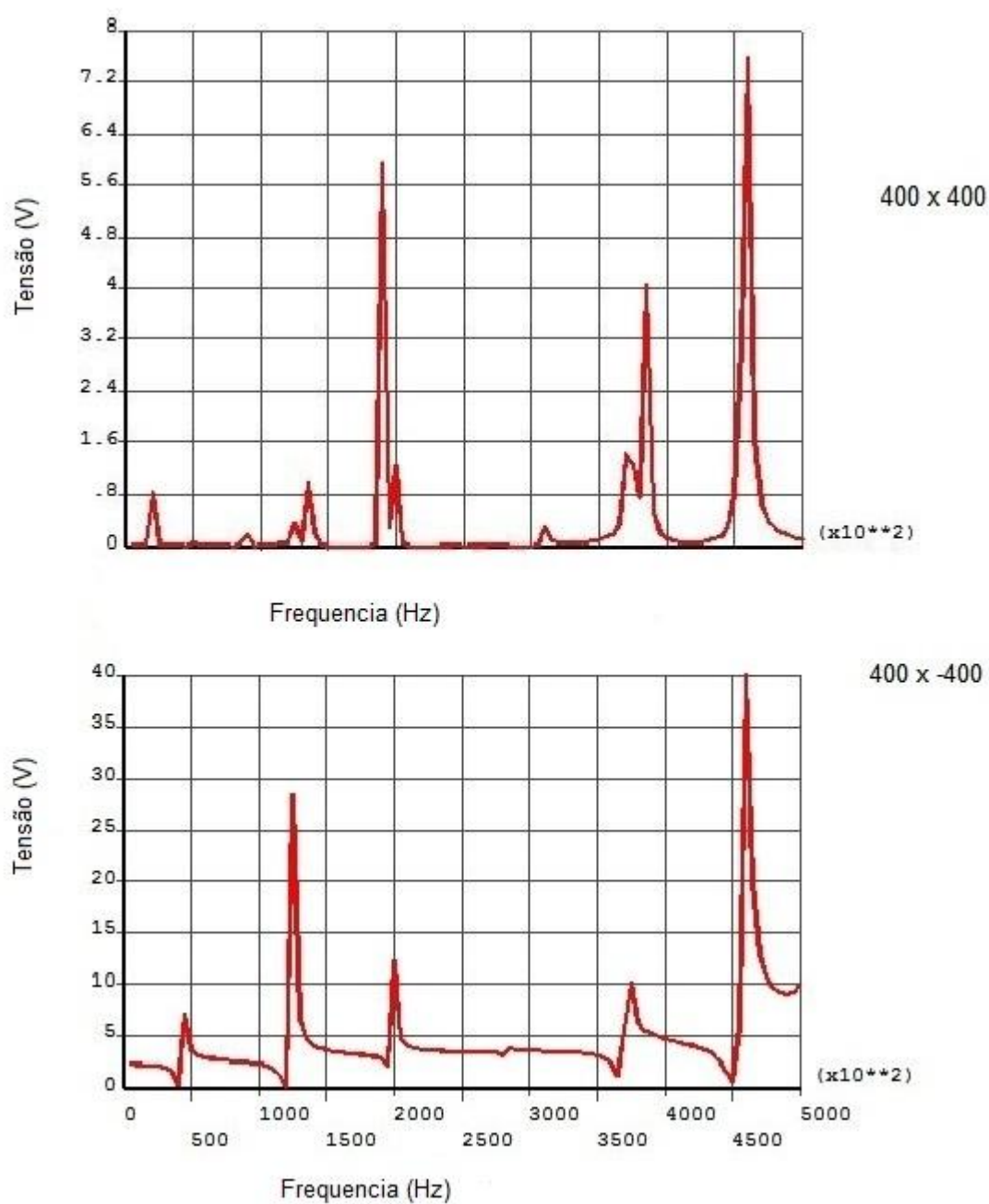


Figura 28 – Comparação das respostas do giroscópio com diferentes excitações das cerâmicas.

A análise que é talvez a mais importante na simulação do piezogiroscópio pelo método de elementos finitos é a da resposta lida nas cerâmicas dada uma velocidade angular. Essa resposta é lida na forma de uma tensão na face livre das cerâmicas de sensoriamento. De acordo com a teoria deve-se obter uma variação da tensão medida de acordo com a velocidade angular que é aplicada ao piezogiroscópio.

Para que seja realizada essa experiência é realizada uma análise harmônica da frequência que se deseja testar para ela mesma (sem varrer uma faixa de frequências) e varia-se a velocidade angular aplicada para verificar-se se há variação da tensão na cerâmica de sensoriamento.

Como foi verificado anteriormente, porém, os modos de vibrar também variam com a rotação, então é interessante que se faça as análises variando a velocidade de rotação e variando a frequência de excitação das cerâmicas também. Essas variações foram feitas, dando atenção às frequências naturais de vibração medidas com a análise modal, e podem ser vistas na Figura 31 e Figura 32.

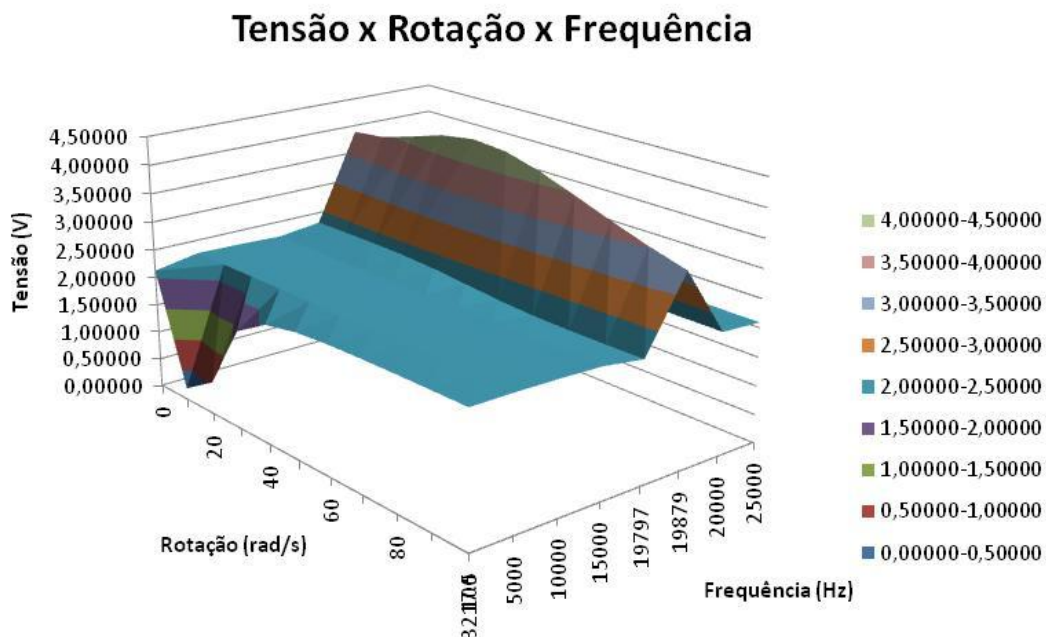


Figura 29 - Tensão x Rotação x Frequência.

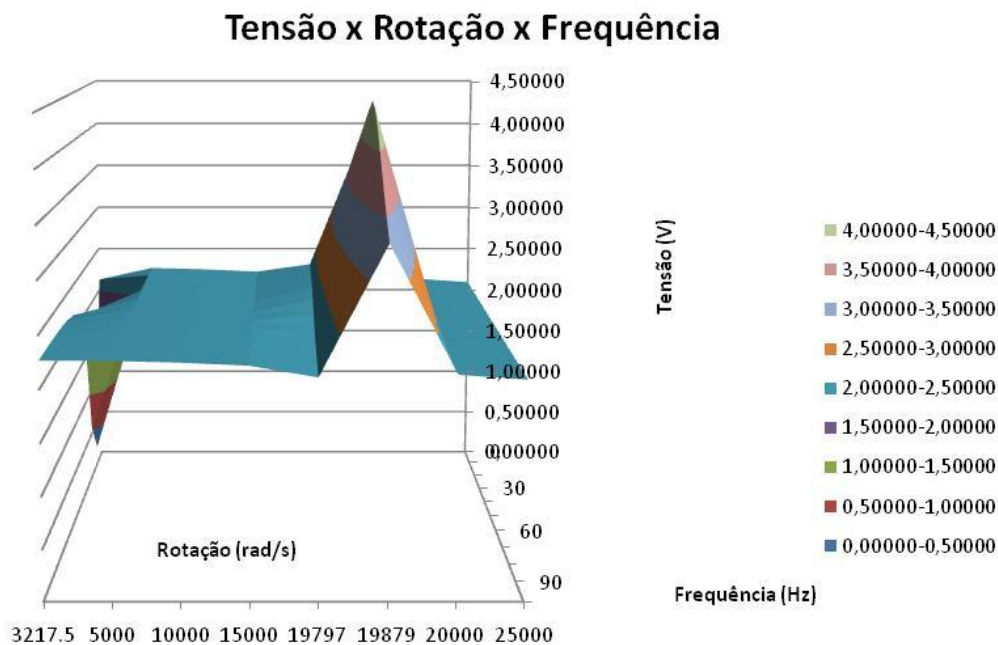


Figura 30 - Tensão x Rotação x Frequência (foco em 19879 Hz).

É visível que existe maior variação de tensão quando se usa frequências de excitação de tensão iguais às frequências naturais de vibrar do piezogiroscópio. Em especial é verificado um pico na frequência de 19879 Hz como pode ser verificado em especial na Figura 32.

Visto que nessa frequência tem-se uma tensão relativamente alta e uma variação de tensão grande em comparação com as outras frequências testadas, decidiu-se que essa frequência é ideal para o trabalho em pauta. Além disso, a faixa de aplicação deve ser restrita entre 0 e 40 rad/s para que se obtenha uma curva mais bem definida como pode ser visto na Figura 31.

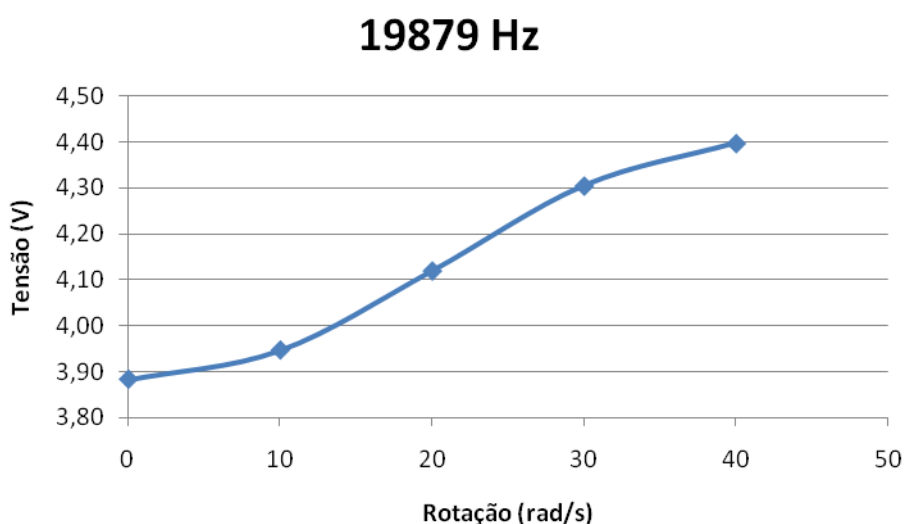


Figura 31 - Tensão x Rotação em 19879 Hz.

4 - Resultados Experimentais

4.1 - Projeto do Protótipo

4.1.1 Mecanismo de excitação do Piezogiroscópio

Para a comparação dos resultados da simulação efetuada no software ANSYS, um mecanismo de excitação do piezogiroscópio de viga vibrante é proposto como mostra a Figura 32. Ele é composto basicamente de um Motor de Corrente Contínua, rolamentos e o Circuito filtragem do sinal (através do osciloscópio).

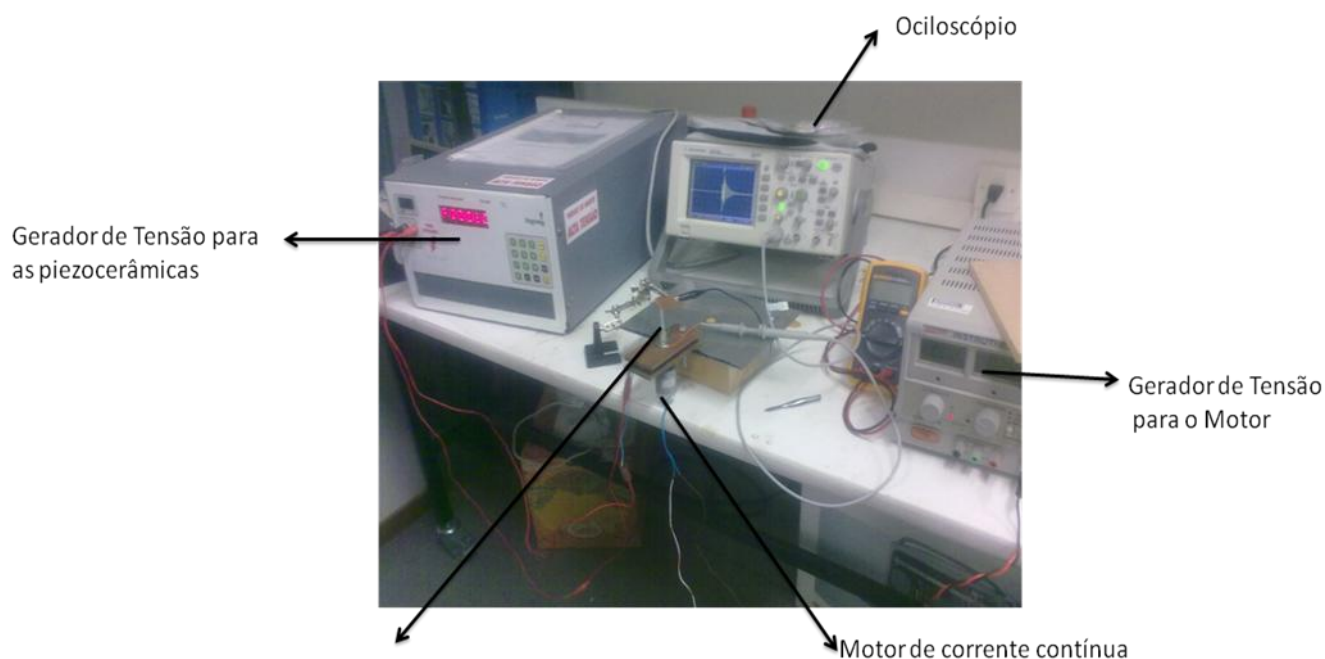


Figura 32 - Mecanismo proposto para excitação do Piezogiroscópio.

A rotação do piezogiroscópio é feita através de um Motor de Corrente Contínua de 12 V e 1000 rpm. O objetivo neste ponto é verificar se, para um dado valor de rotação imposto pelo motor ao Giroscópio, a cerâmica sensora presa a este medirá um determinado valor de tensão, como esperado pelos resultados computacionalmente simulados.

Por se tratar de um sensor funcionalmente preso a uma estrutura giratória, tem-se a dificuldade inerente de excitar o piezogiroscópio e aquisitar os valores de tensão gerados por ele. Para a solução deste problema foi proposto a utilização de rolamentos preso ao eixo do Motor de Corrente Contínua. O circuito de filtragem é

importante para o tratamento dos sinais obtidos pelo piezogiroscópio, pois geralmente os valores de tensão gerados por este são ruidosos.

5 – Conclusão e discussão

5.1 – Discussão

Com o intuito de analisar de maneira crítica este trabalho, esta seção tem por objetivo identificar as principais dificuldades e pontos críticos encontrado e/ou a ser superados em estudos futuros.

Com relação ao conteúdo da pesquisa bibliográfica, identificou-se a ausência de um estudo comparativo de geometrias e configurações, e portanto, este seria um assunto que agregaria grande valor a linha de pesquisa de piezogiросcópios.

No que tange o aspecto prático, primeiramente, o tamanho reduzido do sistema projetado dificulta bastante a sua manufatura, especialmente por esta ter sido realizada de forma artesanal.

O sistema necessitava obter um sinal de uma cerâmica acoplada a um eixo rotativo, o que acarretava na necessidade de um dispositivo que pudesse transmitir esse sinal de maneira satisfatória para um osciloscópio. Tal dispositivo foi encontrado no mercado sendo denominado "slip ring", porém notou-se grande dificuldade na sua aquisição. Optou-se por adaptar um sistema de aquisição por rolamentos, o que gerou grande ruído no sinal captado. Apesar dos resultados práticos terem se mostrado satisfatórios, uma resposta ótima com este sistema exigiria o uso de filtros.

5.2 – Conclusão

Através da pesquisa bibliográfica, buscou-se detalhar o estado da arte no que se refere a estudos sobre piezogiросcópios. Concluiu-se que os estudos referentes à piezogiросcópios com seção quadrada tem mais relevância para este trabalho, já que muitas são as geometrias e configurações possíveis.

As simulações realizadas no ANSYS permitiram identificar e otimizar os parâmetros que influenciam de maneira importante o funcionamento do piezogiросcópio. De maneira prática, pôde-se verificar o funcionamento correto do

piezogirosκόpio através das medições da tensão de saída da cerâmica de sensoriamento que se mostraram diferentes conforme se variava a rotação imposta.

O sinal de saída, devido a características construtivas do piezogirosκόpio, é bastante ruidoso e então a medição pode ser bastante complicada. O que foi observado é que o sinal médio variava em seu valor absoluto. Com o aumento da velocidade angular de rotação do piezogirosκόpio notou-se que a amplitude da tensão elétrica média, medida na cerâmica de sensoriamento, também ficava maior.

Com esses resultados pode-se concluir que o protótipo de piezogirosκόpio testado se comportava de acordo com o que esperado da teoria e da análise de documentos acadêmicos sobre o assunto.

Bibliografia

1. **Bhadbhade, Vikrant, Jalili, Nader e Mahmoodi, S Nima.** A novel piezoelectrically actuated flexural/torsional vibrating beam gyroscope. *Journal of Sound and Vibration*. 2008, Vol. 311, pp. 1305-1324.
2. **Ting, Yung, et al.** Effect of polarized electric field on piezoelectric cylinder vibratory gyroscope. *Sensors and Actuators*. 2006, Vol. A, 128, pp. 248-256.
3. **Yang, Jiashi.** Review of Analyses Related to Vibrations of Rotating Piezoelectric Bodies and Gyroscopes. *Ieee transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. Março de 2005, Vol. 52, 5.
4. **Yang, Jiashi S e Fang, Huiyu Y.** Analysis of a Rotating Elastic Beam with Piezoelectric Films as an Angular Rate Sensor. *Ieee transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. Maio de 2002, Vol. 49, 6.
5. **Abe, Hiroshi, et al.** Trapped-Energy Vibratory Gyroscopes Using a Partially Polarized Piezoelectric Ceramic Plate. *Electronics and Communications in Japan*. Parte 2 , 2001, Vol. 84, 3.
6. **Esmaeili, M, Durali, M e Jalili, N.** Modeling and vibration analysis of vibrating beam microgyroscopes under longitudinal rotation of the support. *Proceedings fo 2005 ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition*. 2005, pp. 5-11.
7. **Malatkar, P.** Nonlinear Vibrations of Cantilever Beams and Plates. *PhD Dissertation*. 2003.
8. **Kagawa, Yukio, Tsuchiya, Takao e Kawashima, Toshikazo.** Finite Element Simulation of Piezoelectric Vibrator Gyroscopes. *Ieee transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control*. 1996, Vol. 43.
9. **Yazdi, Navid, Ayazi, Farrokh e Najafi, Khalil.** Micromachined Inertial Sensors. *Proceedings of the Ieee*. 1998, Vol. 86.

10. **Loveday, Philip W e Rogers, Craig A.** Modification of Piezoelectric Vibratory Gyroscope Resonator Parameters by Feedback Control. *ieee transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. Setembro de 1998, Vol. 45, 5.
11. **Soderkvist, J.** Micromachined gyroscopes. *Sensors and Actuators*. 1994, pp. 65-71.
12. **Uchino, Kenji e R. Giniewicz, Jayne.** *Micromechatronics*. s.l. : Marcel Dekker, 2003.
13. **Minghetti Perrud, Amadeu e Muniz Ribeiro da Silva, Marina.** *Estudo e desenvolvimento de bisturi piezelétrico*. São Paulo : EPUSP, 2006.
14. **Kagawa, Yukio, Tsuchiya, Takao e Sakai, Tsuyoshi.** Three-Dimensional Finite Element Simulation of a Piezoelectric Vibrator Under Gyration. *ieee transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control*. 2001, Vol. 48.