

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO

Curso de Engenharia Elétrica

DIEGO NUNES DE ALMEIDA

**SIMULAÇÃO DE TRANSIENTES EM GIROSCÓPIOS MEMS
TIPO DIAPASÃO**

Itatiba

2012

DIEGO NUNES DE ALMEIDA – R.A. 002200800452

SIMULAÇÃO DE TRANSIENTES EM GIROSCÓPIOS MEMS TIPO DIAPASÃO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Fabbri.

Itatiba

2012

DIEGO NUNES DE ALMEIDA

**SIMULAÇÃO DE TRANSIENTES EM GIROSCÓPIOS MEMS
TIPO DIAPASÃO**

Monografia aprovada pelo programa de graduação da Universidade São Francisco, como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de aprovação: ____ / ____ / ____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Mauricio Fabbri (Orientador)
Universidade São Francisco

Prof. Me. Renato Franco de Camargo (Examinador)
Universidade São Francisco

Prof. João Alex Franciscon Vaz (Examinador)
Universidade São Francisco

A minha Família e aos
meus Amigos, pelo apoio e pela força.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder o dom da vida, pela minha saúde e por iluminar o meu caminho durante a realização desse trabalho.

À toda minha família, em especial aos meus pais José e Ivone, por sempre me apoiar na busca de meus objetivos, por me ajudar em todos os momentos que precisei, por abrir mão de tantas coisas para o meu auxílio, pelo carinho, educação e por me ensinar os verdadeiros valores da vida. Aos meus irmãos Tiago e Mateus que sempre estiveram comigo e a minha avó Cecília, pela paciência e todo afeto por mim durante todo o tempo.

À Universidade São Francisco, pela oportunidade de tornar concreta a realização de um sonho, de maneira geral a todos que fazem parte da instituição e que de alguma forma sei que contribuíram para o meu desenvolvimento.

Ao meu orientador e professor Mauricio Fabbri, pela paciência e dedicação na orientação e no incentivo para realização desse trabalho e por todo conhecimento passado de forma admirável.

Ao meu professor e coordenador de curso Renato, por todo acompanhamento durante esta caminhada de graduação, pelo apoio e auxílio e por participar da minha banca examinadora.

À todos os professores que contribuíram com o meu aprendizado durante esses cinco anos de curso, passando seus conhecimentos e experiências sem medir esforços, aos professores Paulo Silveira e Debora, por contribuírem ao longo do desenvolvimento desse trabalho e ao professor João Alex por aceitar o convite de compor minha banca examinadora.

À todos os meus amigos, que sempre estiveram presentes em todos os momentos da minha vida. Na graduação: Carolina, Nehemias, Fidel, Renan, Marcel e Pedro Neves; por todos os trabalhos e estudos em equipe. E aos amigos do dia-a-dia, que não dá pra citar todos os nomes, mas gostaria de agradecer ao Roni, Edson, Fábio, Felipe; pelo companheirismo.

Enfim, gostaria de agradecer a todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho, que fizeram e fazem ainda mais minha vida valer a pena.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

Madre Tereza de Calcutá

ALMEIDA, Diego Nunes. **Simulação de transientes em giroscópios MEMS tipo diapásão**. 2012. 53 f. Monografia. Curso de Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica da área de exatas da Universidade São Francisco, Itatiba.

RESUMO

Esta monografia apresenta uma abordagem generalizada sobre os tipos de giroscópios baseados na tecnologia de sistemas Microeletromecânicos (MEMS), destacando um tipo promissor para aplicações aeroespaciais conhecido como “*tunning fork*” (diapasão). O objetivo deste trabalho é estudar as respostas de acionamento e detecção em giroscópios microfabricados em silício através de simulação via software. Pela versatilidade na criação de modelos, a plataforma escolhida foi o MATLAB/Simulink, permitindo estudar as soluções do modelo físico/matemático com relativa facilidade e flexibilidade. As simulações mostram o comportamento do tempo transiente, que determina a largura de faixa do dispositivo final (“*bandwidth*”), em função da velocidade angular medida. O modelo reproduz com fidelidade o comportamento esperado no regime linear, enquanto que, para velocidades angulares próximas do limite útil, há um aumento periódico no tempo de resposta transiente. A plataforma escolhida permite o estudo mais detalhado desses efeitos, que exige a consideração de termos de aceleração não incluídos neste trabalho. A simulação de sensores inerciais mostrou ser essencial para a análise minuciosa dos parâmetros de um giroscópio na fase de desenvolvimento.

Palavras-chave: giroscópios MEMS. diapásão. resposta transiente. MATLAB

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Exemplo de uma estrutura MEMS, com referência na dimensão de 3 μm [7]	2
Figura 2: Eixos de comando [3]	3
Figura 3: (a) Um corpo rígido de forma arbitrária em rotação pura em torno do eixo z de um sistema de coordenadas, (b) Seção transversal do corpo rígido em rotação visto de cima, onde a reta de referência faz um ângulo θ com o eixo x. [2]	4
Figura 4: Deslocamento angular $\Delta\theta$ [2]	5
Figura 5: Representação da velocidade angular ω [2]	5
Figura 6: (a) A velocidade v da partícula P é tangente a circunferência no qual o ponto se move, (b) A aceleração linear a da partícula P possui em geral duas componentes: a aceleração tangencial a_t e a aceleração radial a_r [2]	7
Figura 7: (a) Representação vetorial da velocidade angular e escalar e da aceleração centrípeta, (b) Surgimento da força de Coriolis, consequência do aumento do raio percorrido pela partícula referencial. [fonte própria]	8
Figura 8: Imagem de microscopia eletrônica de um protótipo de um giroscópio tipo diapásio [5]	9
Figura 9: (a) Giroscópio roda oscilante com sensores de detecção capacitivos, (b) imagem de microscopia eletrônica de um giroscópio tipo pêndulo de Foucault [1]	10
Figura 10: (a) Imagem de varredura eletrônica de uma estrutura tipo anel ressonante, (b) Giroscópio de estrutura ressonante comercial [4]	11
Figura 11: Etapas de uma microusinagem em volume [8]	13
Figura 12: Etapas do processo de uma microusinagem em superfície [8]	15
Figura 13: Corrosão úmida isotrópica (mesma propriedade física independente da direção considerada) e anisotrópica (certas propriedades físicas variam conforme a direção) [6]	16
Figura 14: Imagem de microscopia eletrônica corrosão úmida isotrópica [11]	16
Figura 15: Corrosão por plasma através do processo RIE (corrosão iônica reativa) [6]	17
Figura 16: Imagem de microscopia eletrônica de uma corrosão por plasma RIE [10]	17
Figura 17: Imagem de microscopia eletrônica de corrosão por DRIE [10]	18

Figura 18: (a) Imagem de microscopia eletrônica de corrosão DRIE “processo Bosch”, (b) Logomarca BOSCH esculpida em silício [9].....	18
Figura 19: Diapasão [fonte própria].....	19
Figura 20: Representação de um oscilador mecânico com dois graus de liberdade, onde K_{xx} e K_{yy} representam as constantes de mola e D_{xx} e D_{yy} de atrito [1].....	19
Figura 21: Estrutura TFG simétrica e desacoplada [1]	20
Figura 22: Sistema de suspensão [1].....	21
Figura 23: Ponto de máximo do <i>sense</i> e velocidade de rotação angular no ponto de máximo. [fonte própria]	24
Figura 24: Modelo de simulação para duas equações de segunda ordem acopladas [fonte própria]	25
Figura 25: Tempo transiente e regime [fonte própria].....	26
Figura 26: Percentual para constante de tempo adotada [15]	27
Figura 27: Bloco <i>Sine Wave</i> , responsável por excitar o modo atuador do giroscópio [16]....	28
Figura 28: Bloco <i>Interval Test</i> da classe <i>Logic and Bit Operations</i> [16].....	28
Figura 29: Bloco <i>Abs</i> da classe <i>Math Operations</i> [16].....	28
Figura 30: Exemplo de aplicação do bloco de módulo <i>Abs</i> [fonte própria]	29
Figura 31: Resposta para velocidade de rotação Ω igual a zero [fonte própria]	30
Figura 32: Resposta para velocidade de rotação $\Omega \ll \omega_0$ [fonte própria]	31
Figura 33: Gráfico do tempo transiente versus fator de amortecimento ξ [fonte própria]	32
Figura 34: Gráfico da amplitude de <i>sense</i> Y_0 versus velocidade de rotação externa Ω [fonte própria]	34
Figura 35: Gráfico da amplitude de <i>drive</i> X_0 versus velocidade de rotação externa Ω [fonte própria]	36
Figura 36: Comportamento do modo <i>drive</i> com aumento da velocidade de rotação externa. [fonte própria]	36
Figura 37: Gráfico do tempo transiente do <i>sense</i> versus Ω [fonte própria]	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tempo transiente versus fator de amortecimento ξ [fonte própria]	31
Tabela 2: Amplitude de <i>sense</i> Y_0 versus velocidade de rotação externa Ω [fonte própria] ...	33
Tabela 3: Amplitude de <i>drive</i> X_0 versus velocidade de rotação externa Ω [fonte própria]	35
Tabela 4: Gráfico do tempo transiente do <i>sense</i> versus Ω [fonte própria]	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEMS - *Micro Electro Mechanical System* (Sistemas Microeletromecânicos)

LIGA – *Lithografie Galvanoformung Abformung*

LPVCD – *Low-Pressure Chemical Vapor Deposition*

RIE – *Reactive Ion Etching*

DRIE – *Deep Reactive Ion Etching*

TFG – *Tuning Fork Gyro*

Mp - Massa de prova

Mps – Massas de prova

Abs – *Absolut*

MATLAB – *MATrix LABoratory*

ddp – diferença de potencial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 DEFINIÇÕES.....	2
2.2 GIROSCÓPIOS MEMS.....	3
2.3 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	6
2.4 TIPOS DE GIROSCÓPIOS MEMS	9
2.4.1 Giroscópio tipo diapasão (<i>tuning fork</i>).....	9
2.4.2 Giroscópio tipo roda oscilante (<i>spinning or vibrating wheels</i>)	10
2.4.3 Giroscópio hemisférico ressonante	10
2.5 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	11
2.5.1 Tecnologias e técnicas de microfabricação.....	11
2.5.2 Tecnologia de processos específicos.....	12
2.5.3 Tecnologias de processos compatíveis com a fabricação de CIs.....	12
2.5.3.1 “Microusinagem em volume” (<i>bulk micromachining</i>).....	12
2.5.3.2 “Microusinagem em superfície” (<i>surface micromachining</i>).....	13
2.5.4- Corrosão.....	15
2.5.4.1 Corrosão úmida	15
2.5.4.2 Corrosão seca.....	16
2.5.4.3 DRIE	17
2.6 CARACTERÍSTICAS DO GIROSCÓPIO TIPO DIAPASÃO (TFG).....	19
3 METODOLOGIA.....	22
3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA	22
3.2 SOFTWARE PARA SIMULAÇÃO	25
3.2.1 Modelos matemáticos	25
3.2.2- Simulação.....	27
4 RESULTADOS	30
4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO.....	30
4.2 ANÁLISE DO FATOR DE AMORTECIMENTO ξ	31
4.3 COMPORTAMENTO DO MODO <i>SENSE</i>	32
4.4 COMPORTAMENTO DO MODO <i>DRIVE</i>	34
4.5 TEMPO TRANSIENTE NA FAIXA ÚTIL DO DISPOSITIVO	37
5 CONCLUSÃO.....	39
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

Por muito tempo, o setor automotivo deteve as maiores parcelas de crescimento no uso de sensores inerciais. Atualmente muitos são os segmentos que buscam novos desafios e aperfeiçoamentos nesta área. Destacam-se os dispositivos portáteis tais como GPS, estabilizadores em câmeras digitais, celulares e controladores de jogos. Estudos também vêm sendo realizados para uso na indústria biomédica e em aplicações aeroespaciais.

O desenvolvimento concreto da navegação inercial está diretamente ligado a dois tipos de sensores inerciais, o acelerômetro e o giroscópio. O acelerômetro, como o próprio nome sugere, é um dispositivo fabricado com o intuito de medir a aceleração de determinado corpo, possibilitando obter-se as forças que agem sobre o mesmo. Já os giroscópios são capazes de determinar a velocidade angular (velocidade de rotação em torno de um eixo de referência) do corpo ao qual estiver anexado. As informações coletadas nestes sensores, juntamente com as equações de movimento (leis de Newton), possibilitam monitorar e computar todo o trajeto de um veículo e posteriormente fazer correções necessárias e/ou desejáveis em sua navegação.

Em aplicações aeroespaciais, um dos grandes desafios é fazer medições de rotação precisas em veículos ou corpos rígidos. Quanto menor for o erro desejado, maior o grau de desempenho do giroscópio e conseqüentemente mais sofisticado será o instrumento para tal aplicação. Via de regra, para atender os requerimentos de desempenho aeroespaciais é necessário o uso de tecnologias e princípios eletromecânicos avançados.

Neste contexto, a tecnologia MEMS é uma excelente alternativa para a produção de dispositivos inerciais de alta precisão, apresentando uma série de vantagens, tais como: baixo custo de fabricação para grandes escalas de produção, compactação de dispositivos, redução de peso, baixo consumo, alta confiabilidade e uma inteligência aumentada.

Os acelerômetros foram os primeiros dispositivos a serem desenvolvidos a partir dessa tecnologia e atualmente são amplamente comercializados. O mesmo caminho está sendo trilhado pelos giroscópios MEMS, que apresentam uma dinâmica mais complexa, exigindo amplos conhecimentos em vários campos da física além de requisitos específicos do meio onde o dispositivo atuará, no caso, para aplicações aeroespaciais.

Este trabalho estará centrado em demonstrar as características de fabricação, funcionamento e posterior estudo do comportamento e análise das respostas do giroscópio MEMS tipo diapásão. Uma maneira de obter melhores resultados com esse tipo de giroscópio é a análise minuciosa de sua dinâmica e erros, a fim de encontrar metodologias que tornem o projeto eficiente para determinada aplicação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definições

A sigla MEMS (do inglês *Micro Electro Mechanical System*) diz respeito a Sistemas Microeletromecânicos, nome dado à tecnologia que integra elementos mecânicos, sensores e eletrônica em um único dispositivo. Pode ser compreendida como uma estrutura eletromecânica projetada em pequenas escalas, na ordem dos micrometros, (figura 1) tendo como grande desafio a miniaturização e integração com circuitos eletrônicos, que encontram-se em estágios bastante avançados de desenvolvimento.

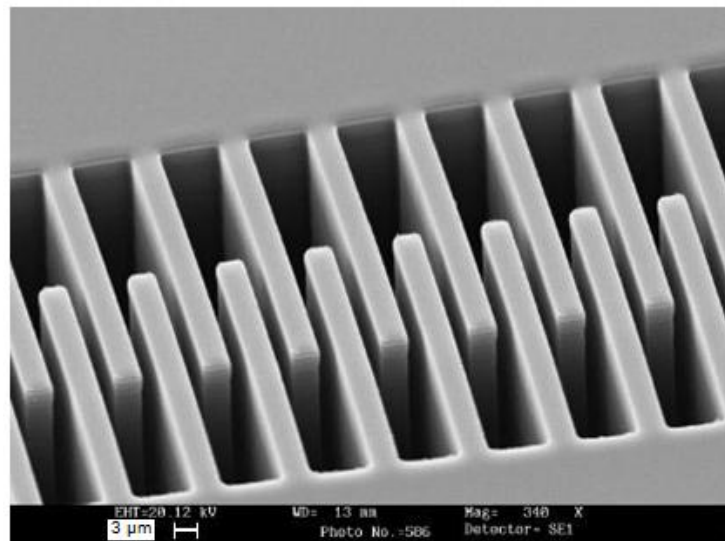


Figura 1: Exemplo de uma estrutura MEMS, com referência na dimensão de 3 µm [7]

Basicamente as estruturas MEMS são compostas por três partes fundamentais: o sensor/atuador, interface analógica (processamento do sinal vindo do sensor) e a parte de controle digital e processamento numérico.

O microsistema final é encontrado sob duas maneiras: monolítica ou híbrida. Quando a eletrônica encontra-se separada da parte que contém o sensor o sistema é chamado de híbrido, já quando todas as partes do sistema se encontram integradas em um mesmo chip chamamos de monolítica.

Os sistemas monolíticos apresentam vantagem sobre os híbridos, oferecendo melhores desempenhos, uma vez que a integração entre as partes do sistema evitam problemas de interface. Já o processo que utiliza dispositivos eletromecânicos discretos

(híbrido) é mais apropriado quanto à produção em pequenas escalas, o que permite tempos menores no desenvolvimento de protótipos, interdependência reduzida entre as etapas de fabricação da parte microsensora e do circuito eletrônico de processamento, testes executados com mais facilidade, entre outros. Tudo isso permite modificações de fácil acesso conforme a necessidade do projeto.

A tecnologia MEMS vem sendo muito utilizada e estudada na área de navegação inercial para aplicações aeroespaciais, onde se requer um alto índice de precisão, robustez e confiabilidade nas medições. Grande parte das empresas vem desenvolvendo trabalhos com sistemas híbridos, visto que os circuitos eletrônicos para interfaceamento e transdução estão disponíveis comercialmente.

2.2 Giroscópios MEMS

Conforme citado anteriormente, o giroscópio é um dispositivo utilizado para fazer medições de velocidade de rotação em um corpo rígido ao redor de um eixo fixo, ou seja, determinar a sua velocidade angular.

Conforme a orientação de montagem do dispositivo giroscópio, a rotação é medida em relação a um dos três eixos do veículo: guinada (*yaw*), arfagem (*pitch*) e rolamento (*roll*) (figura 2), ou seja, para medição dos três eixos simultaneamente seria necessário a montagem de três estruturas, cada uma orientada para um eixo, tendo como resultado final a composição dos sinais de cada estrutura.

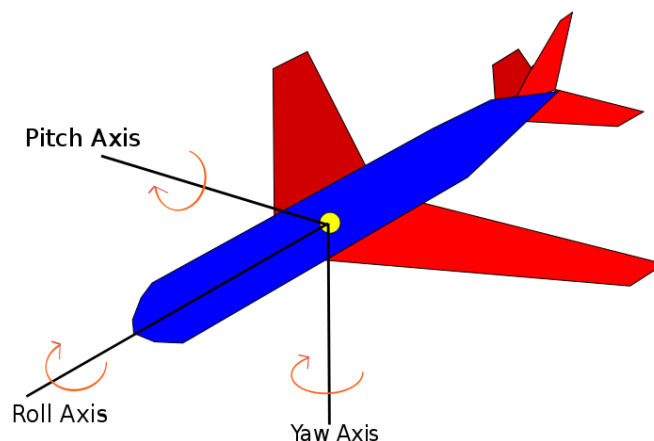


Figura 2: Eixos de comando [3]

O giroscópio, por ser um sensor inercial requer o conhecimento de muitas grandezas físicas para seu perfeito entendimento, que serão vistas a seguir.

Iniciaremos falando da posição angular, ilustrado na figura 3a, através de uma reta de referência, fixa ao corpo, perpendicular ao eixo de rotação e girando. A posição angular dessa reta é o ângulo que ela faz com uma reta fixa considerada como sendo a posição angular zero. Observando o mesmo corpo de um ponto agora localizado na parte superior do eixo z (figura 3b) a posição angular θ é medida em relação ao semi-eixo x positivo.

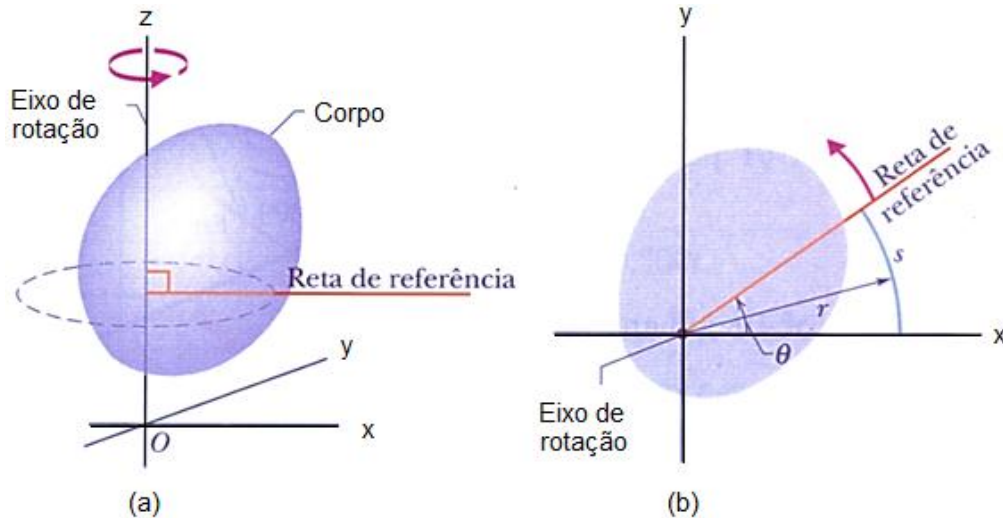


Figura 3: (a) Um corpo rígido de forma arbitrária em rotação pura em torno do eixo z de um sistema de coordenadas, (b) Seção transversal do corpo rígido em rotação visto de cima, onde a reta de referência faz um ângulo θ com o eixo x. [2]

Nesse caso θ é dado por:

$$\theta = \frac{s}{r} \text{ (ângulo em radianos)} \quad (1)$$

Onde s é comprimento de um arco de circunferência que vai do eixo x (posição angular zero) até a reta de referência e r é o raio da circunferência.

O ângulo definido dessa forma é medido em radianos e como é dado pela razão entre dois comprimentos torna-se um número puro, sem dimensão.

Como o comprimento de uma circunferência de raio r é $2\pi r$, uma circunferência completa equivale a 2π radianos. Para uma rotação pura de um corpo rígido podemos avaliar tudo a respeito do movimento da partícula se $\theta(t)$ for conhecido, ou seja, a posição angular da reta de referência do corpo em função do tempo.

Tomando como base o corpo da figura 3a, digamos que ele gira em torno do eixo de rotação como na figura 3b com a posição angular da reta de referência variando de θ_1 para θ_2 . Neste caso dizemos que o corpo sofre um deslocamento angular dado por:

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 \text{ (figura 4)} \quad (2)$$

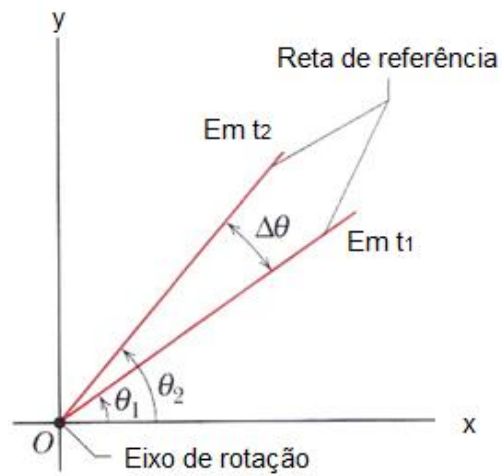


Figura 4: Deslocamento angular $\Delta\theta$ [2]

A velocidade angular também é uma grandeza vetorial.

Consideremos, como na figura 5a, um disco girando com velocidade angular constante (revoluções/minuto) no sentido horário. Sua velocidade angular pode ser representada por um vetor $\vec{\omega}$ apontando ao longo do eixo de rotação seguindo as seguintes regras:

-O comprimento do vetor é escolhido de acordo com uma escala conveniente, por exemplo, 1 cm a cada 10 rev/min; (figura 5b)

-Usando a regra da mão direita determina-se o sentido do vetor $\vec{\omega}$. Envolvendo o disco com a mão direita, com os dedos apontando o sentido de rotação; o polegar estendido mostra o sentido do vetor velocidade angular. (figura 5c)

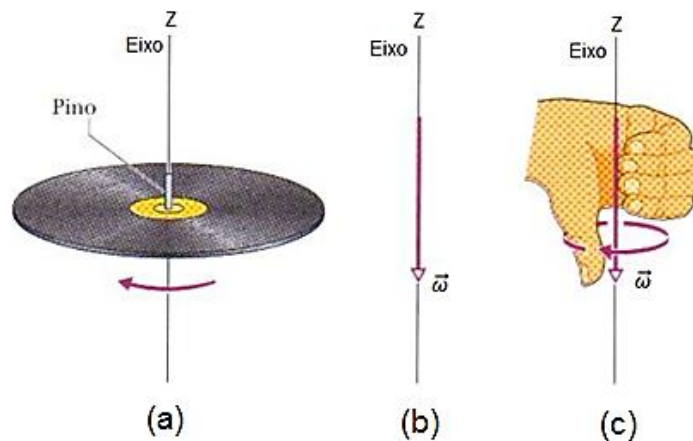


Figura 5: Representação da velocidade angular ω [2]

Suponhamos que um corpo em rotação está em uma posição angular θ_1 no instante t_1 e na posição angular θ_2 e no instante t_2 . Definimos a velocidade angular média do corpo no intervalo de tempo Δt de t_1 a t_2 como:

$$\omega(med) = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (3)$$

Onde $\Delta\theta$ é o deslocamento angular que acontece durante o intervalo de tempo Δt .

A velocidade angular (instantânea) $\vec{\omega}$ é o limite da razão da equação anterior, quando Δt tende a zero:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

Uma vez que $\theta(t)$ é conhecido, podemos calcular a velocidade angular $\vec{\omega}$ por derivação. A unidade de velocidade angular mais conveniente para o projeto mecânico é o radiano por segundo.

$$[\omega] = rad/s \quad (5)$$

2.3 Princípios de Funcionamento

A maioria dos giroscópios construídos a partir da tecnologia MEMS favorece-se do efeito de Coriolis. A força de Coriolis é chamada por alguns autores de força “fictícia” pelo fato de ser um efeito que atua junto com o movimento de arrastamento e a força centrífuga, em corpos cujo sistema de referência se encontre em rotação.

Por exemplo, se tivermos uma partícula em movimento circular com velocidade angular $\vec{\omega}$ sob um raio r (figura 6a), a mesma desenvolve uma velocidade escalar $\vec{v}$ dada por:

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad [m/s] \quad (6)$$

Nesse caso, a partícula possui uma aceleração $\vec{a}$ que apresenta duas componentes, uma tangencial ($\vec{a}_t$) e uma radial ($\vec{a}_r$) dadas por: (figura 6b).

$$a_t = \alpha r \text{ (ângulo em radianos)} [m/s^2] \quad (7)$$

$$a_r = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r \quad [m/s^2] \quad (8)$$

Onde $\alpha = d\omega/dt$

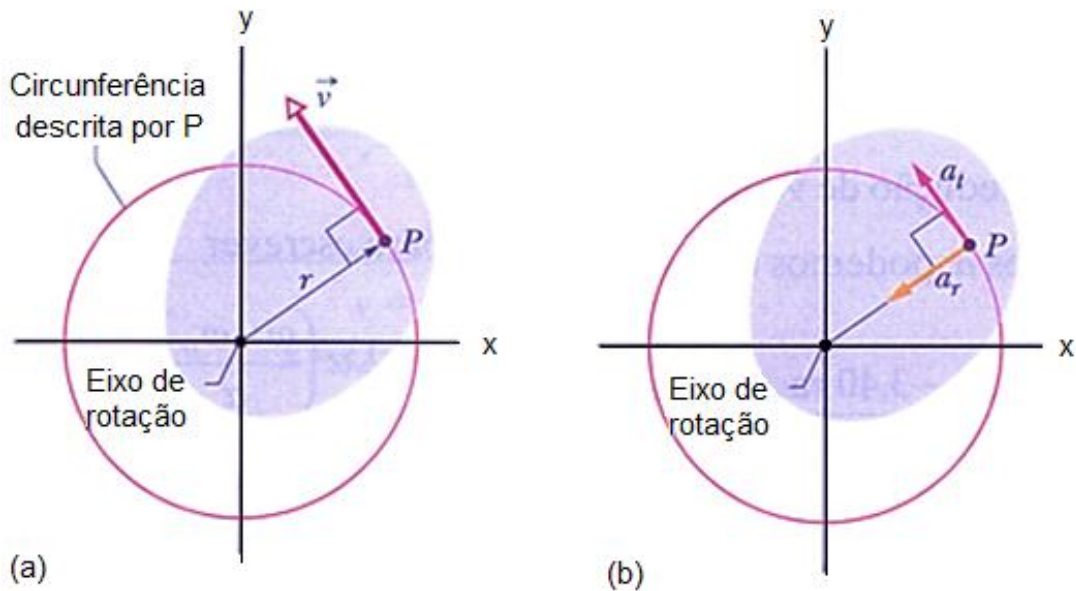


Figura 6: (a) A velocidade $\vec{v}$ da partícula P é tangente a circunferência no qual o ponto se move, (b) A aceleração linear $\vec{a}$ da partícula P possui em geral duas componentes: a aceleração tangencial $\vec{a}_t$ e a aceleração radial $\vec{a}_r$ [2]

Mantendo corpo P em uma velocidade angular constante e provocando um deslocamento radial de r para R ($R > r$), a velocidade escalar v' da partícula no novo ponto onde se encontra será R/r maior, uma vez que a velocidade escalar é diretamente proporcional ao raio da circunferência que a partícula descreve.

Com essa mudança de velocidade experimentada pela partícula tem-se o surgimento do que chamamos “força de Coriolis”. No exemplo dado (movimento de $r \rightarrow R$), para que a partícula se mantenha em linha reta será necessária uma força adicional, devido ao aumento da velocidade na direção perpendicular ao movimento. É como se o corpo experimentasse uma força “fictícia” na mesma direção e sentido oposto do vetor $\vec{v}$ (figura 7). Analogamente (partícula se movendo de $R \rightarrow r$), tem-se a força na mesma direção e sentido do vetor $\vec{v}$.

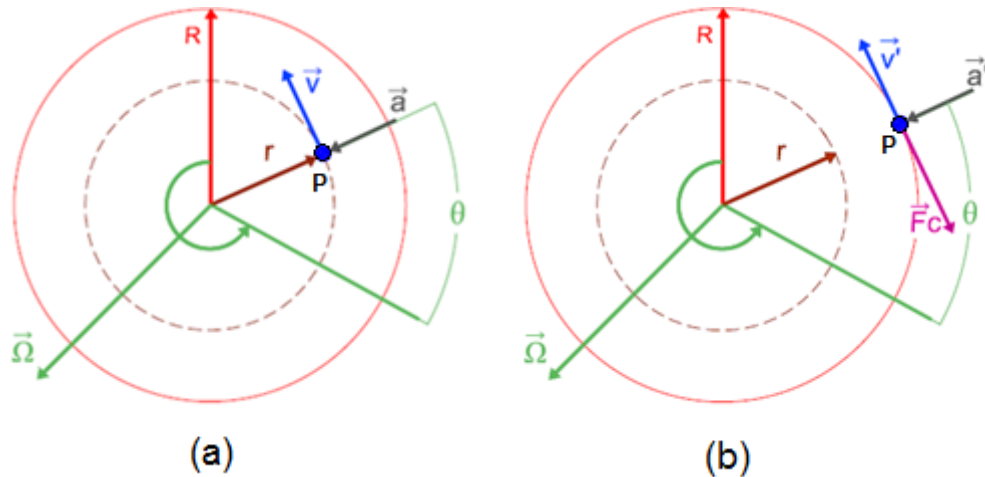


Figura 7: (a) Representação vetorial da velocidade angular e escalar e da aceleração centrípeta, (b) Surgimento da força de Coriolis, consequência do aumento do raio percorrido pela partícula referencial. [fonte própria]

Podem-se encontrar giroscópios MEMS com inúmeros princípios de funcionamento, mas o mais encontrado na literatura se baseia em oscilar um elemento mecânico para detectar o efeito de Coriolis. Tal elemento é basicamente uma massa de prova (M_p), suspensa acima de um substrato por um sistema de molas possuindo dois graus de liberdade, configurando assim os dois modos de vibração do giroscópio, o modo de atuação (*drive*) e o de detecção (*sense*).

A partir de uma força externa, por exemplo, uma força eletromagnética, o modo de atuação é excitado, geralmente na frequência de ressonância, permitindo seu máximo ganho e por consequência a máxima sensibilidade. A excitação deste modo provoca um deslocamento oscilatório na massa de prova. Se o giroscópio se encontrar em movimento de rotação em relação a um eixo perpendicular ao plano de oscilação a massa de prova estará experimentando mudanças no raio em relação a esse eixo.

Como foi visto, mudanças de valores radiais em uma partícula que se encontra sobre ação de uma velocidade angular provoca o surgimento da força de Coriolis, responsável por transferir energia para o segundo modo de vibração, o modo sensor. Essa energia será proporcional à velocidade angular da rotação.

O deslocamento da massa oscilante nesta nova direção corresponde ao segundo modo de vibração, que por sua vez pode ser detectado por diferentes métodos apresentados mais adiante.

O desempenho do giroscópio também depende do desacoplamento mecânico entre os modos de operação. Para isso acontecer, os movimentos ocorridos no eixo x (atuação) não devem interferir nas vibrações do modo sensor e vice-versa; assim é conveniente que o dispositivo apresente sistemas de suspensão independentes.

2.4 Tipos de Giroscópios MEMS

O conteúdo bibliográfico utilizado na pesquisa apresenta diversos tipos de giroscópios MEMS, classificados conforme sua estrutura. A seguir será descrito breves comentários a respeito das principais e mais utilizadas.

2.4.1 Giroscópio tipo diapásão (*tuning fork*)

O giroscópio tipo diapásão é constituído por duas massas de prova oscilantes, atuadas na mesma direção e sentidos opostos. Quando acontece a rotação, a força de Coriolis imprime uma vibração ortogonal ao movimento de atuação e através de métodos de detecção a amplitude do movimento pode ser mensurada.

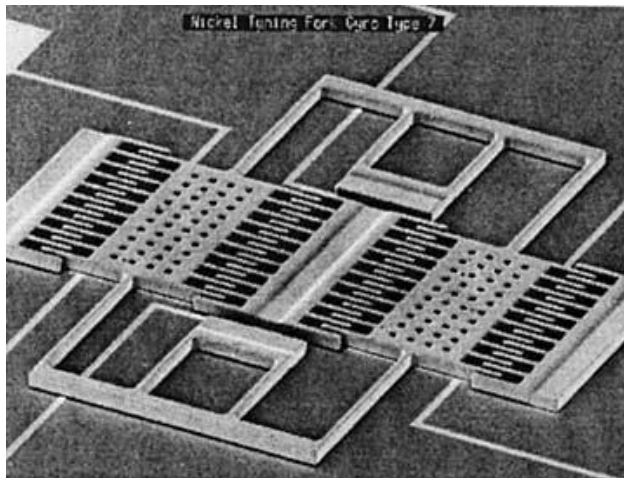
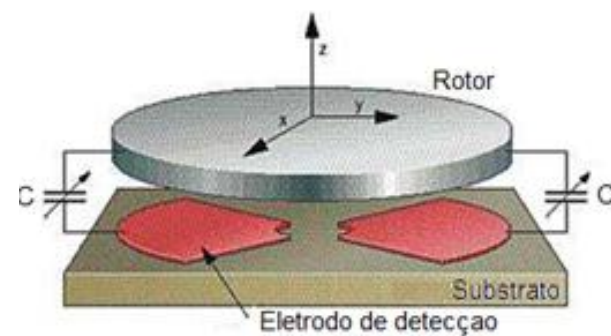


Figura 8: Imagem de microscopia eletrônica de um protótipo de um giroscópio tipo diapásão [5]

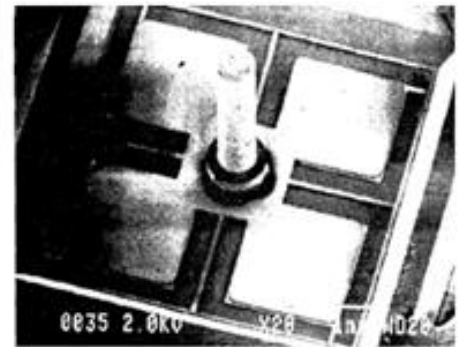
O uso de duas massas de prova conjugadas na configuração citada permite ao giroscópio tipo diapásão uma maior precisão na medida. Essa estrutura é muito conhecida por rejeitar os efeitos de modo-comum. Por exemplo, se o dispositivo for sujeito á uma aceleração linear, ambas as Mps se comportaram de modo idêntico e através da detecção de modo diferencial da posição este efeito pode ser anulado. A operação diferencial também torna o dispositivo relativamente imune aos efeitos de vibração externas. [FORHAN,2009]

2.4.2 Giroscópio tipo roda oscilante (*spinning or vibrating wheels*)

Dotado de uma “roda”, atuada para vibrar em seu eixo axial de simetria, ao ocorrer uma rotação o dispositivo sofre inclinações, as quais podem ser detectadas por sensores capacitivos (figura 9a). Com esse mesmo princípio de funcionamento, baseado na oscilação de uma estrutura com uma haste orientada para fora do plano do dispositivo, também é desenvolvido o giroscópio tipo pêndulo de Foucault (figura 9b).



(a)



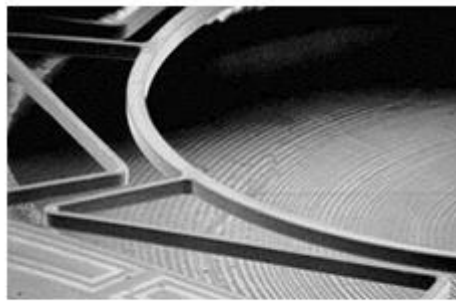
(b)

Figura 9: (a) Giroscópio roda oscilante com sensores de detecção capacitivos, (b) imagem de microscopia eletrônica de um giroscópio tipo pêndulo de Foucault [1]

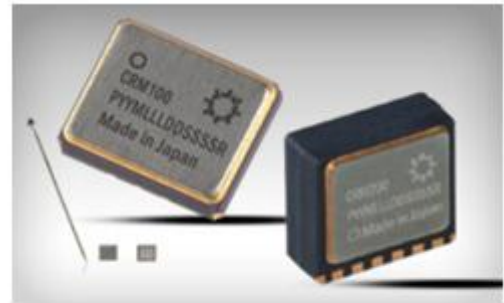
2.4.3 Giroscópio hemisférico ressonante

Consiste em um anel suspenso por molas e atuado na ressonância no seu primeiro modo de vibração, descrevendo um movimento oscilatório em formato elíptico. Na presença de uma rotação, pelo efeito de Coriolis, uma energia é transferida ao segundo modo de vibração, descrevendo a mesma oscilação e com amplitude proporcional a rotação.

Este tipo de giroscópio baseia-se em princípios eletromagnéticos para sua atuação, e para a detecção pode ser utilizado, por exemplo, os níveis de tensão induzidos em sua estrutura.



(a)



(b) CRM 100- Anel ressonante

Figura 10: (a) Imagem de varredura eletrônica de uma estrutura tipo anel ressonante, (b) Giroscópio de estrutura ressonante comercial [4]

Embora existam vários tipos de giroscópios, todos se baseiam no mesmo princípio, o efeito de Coriolis. Nesse trabalho será abordado o giroscópio MEMS tipo diapasão, por apresentar características que o tornam promissor para aplicações aeroespaciais.

2.5 Processos de Fabricação

A fabricação do giroscópio MEMS passa por uma série de etapas que envolvem processos bem conhecidos na construção de dispositivos microeletrônicos. Basicamente são elas: litografia (gravação de máscaras), corrosão, limpeza e ativação de superfícies para solda, recozimentos térmicos, metalização e soldagem de contatos.

A maior fonte de erros em estruturas oscilantes é o erro de quadratura, causado por imperfeições e assimetrias que alteram o deslocamento ideal da M_p . Mesmo os giroscópios dotados de sistemas de atuação e detecção desacoplados mecanicamente podem ser afetados por imperfeições ocorridas na fabricação, o que altera a resposta do sensor. Por esta razão a escolha do material, o processo de fabricação, o desenho da estrutura e sistema de suspensão devem ser feitos minuciosamente, visando a minimização dos erros.

2.5.1 Tecnologias e técnicas de microfabricação

Após os processos de desenvolvimento e otimização o layout do dispositivo MEMS é criado através de softwares. O desenho da estrutura é então gravado em máscaras, por

litografia, e esse padrão é transferido ao substrato (silício). Grande parte do processo de fabricação ocorre nesta fase, que demanda maior parte dos custos envolvidos.

2.5.2 Tecnologia de processos específicos

De posse do layout da estrutura são criados moldes, geralmente feitos em polímeros fotossensíveis. A microestrutura é obtida pelo preenchimento do molde com o formato esperado. Nesta fase são utilizados com frequência materiais como o carvão de silício, polisilício e plásticos. Posteriormente o processo é submetido à corrosão, a qual separa o molde da estrutura.

Também existem técnicas que utilizam a deposição eletroquímica para preenchimento do molde, podendo ser citada a LIGA (do alemão *Lithografie Galvanoformung Abformung*), que envolve litografia profunda por raios X suaves ou ultravioletas. Vários trabalhos foram desenvolvidos em giroscópios de níquel utilizando a técnica LIGA, mas o desempenho do dispositivo final não atinge níveis de precisão requeridos para aplicações aeroespaciais, devido a propriedades mecânicas do material, elevada dissipação interna e baixo fator de qualidade.

2.5.3 Tecnologias de processos compatíveis com a fabricação de CIs

Na fabricação de toda estrutura MEMS não existe um fluxograma padrão que possa ser utilizado. A escolha da tecnologia a ser usada dependerá das características específicas do projeto, das dimensões da estrutura e de outros fatores. As técnicas mais utilizadas são descritas abaixo.

2.5.3.1 “Microusinagem em volume” (*bulk micromachining*)

Geralmente utilizada quando a estrutura desejada tem espessura superior a 10 μ m e consiste na corrosão do silício para formar o dispositivo desejado.

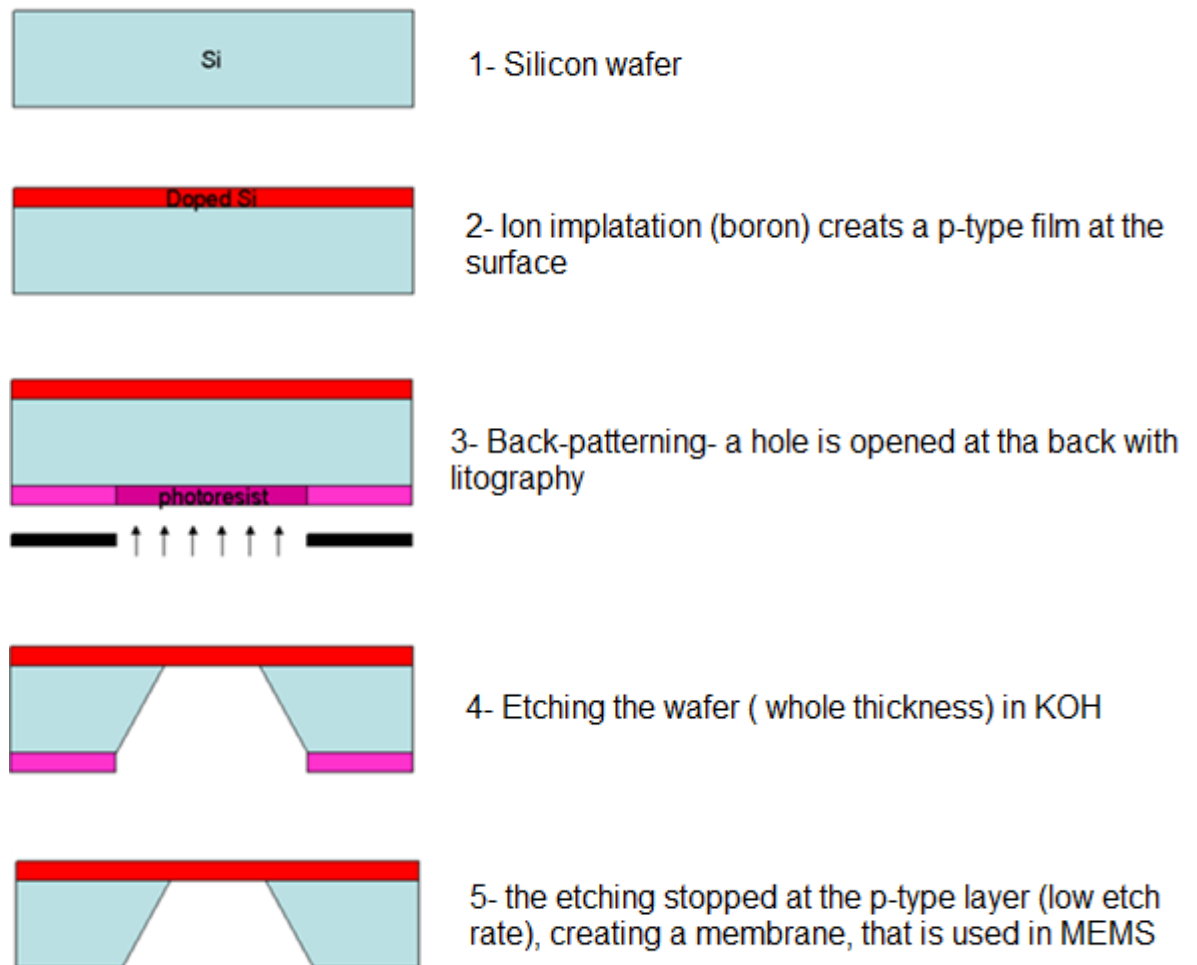
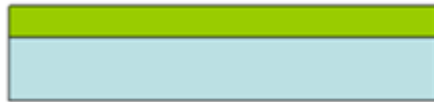
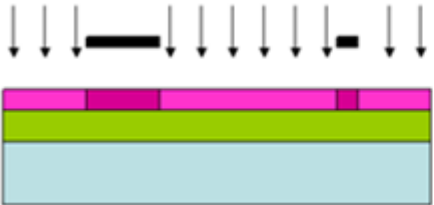


Figura 11: Etapas de uma microusinagem em volume [8]

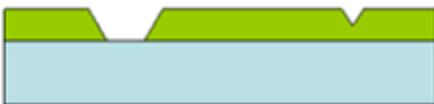
2.5.3.2 “Microusinagem em superfície” (*surface micromachining*)

Empregado em estruturas com espessura inferiores a $10\mu\text{m}$, consiste na corrosão e/ou remoção de camadas presentes na superfície do substrato, que são denominadas camadas sacrificiais.

Normalmente é acompanhada de processos de deposição ou crescimento de materiais por LPCVD (*Low-pressure Chemical Vapor Deposition*), onde funcionarão como camada de isolamento das estruturas, camadas sacrificiais que serão removidas para obter o formato desejado, espaçadores e por fim camadas estruturais utilizadas para a fabricação de MEMS. A figura a seguir ilustra as etapas que compõem o processo.

1- Deposition of SiO₂ - sacrificial layer2- Patterning the SiO₂

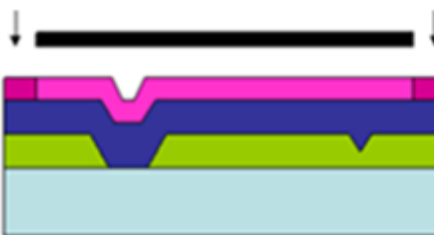
3- Etching anisotropically (wet) the sacrificial layer



4- Wafer after resist removal



5- Deposition of polysilicon - the cantilever material



6- Patterning the polysilicon - defining the cantilever



7- Etching the polysilicon - defining the cantilever



8- Wafer after resist removal

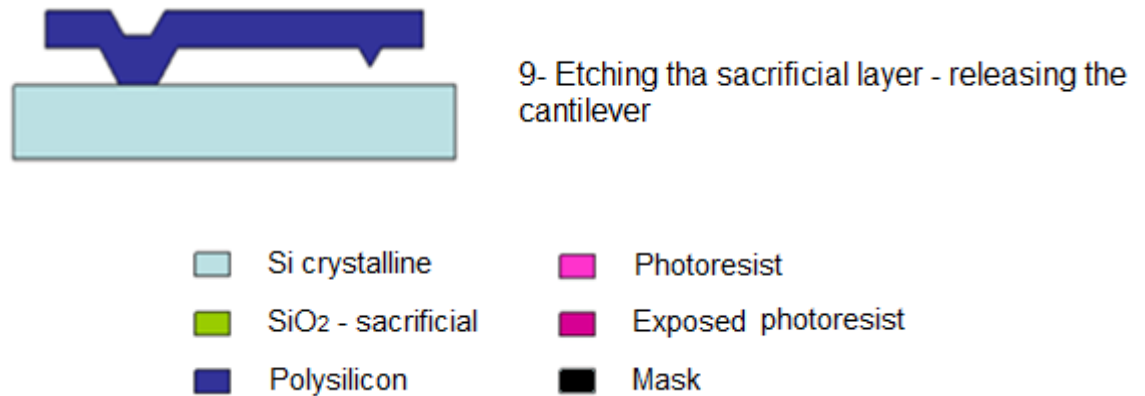


Figura 12: Etapas do processo de uma microusinagem em superfície [8]

O silício policristalino, por ter propriedades mecânicas relativamente similares as do silício monocristalino, é muito utilizado como camada estrutural. O óxido de silício e o nitreto de silício, por sua vez, são comumente usados como camadas isolantes (elétrico) entre a estrutura e o substrato. [FORHAN,2009]

2.5.4- Corrosão

Outra etapa que constitui a microusinagem é a corrosão, que pode ser úmida, através de um processo químico, ou a seco, através de um equipamento de corrosão iônica reativa por plasma (*Reactive Ion Etching* – RIE). Pode-se também ter a combinação de ambas as técnicas.

2.5.4.1 Corrosão úmida

A corrosão úmida é utilizada quando se deseja remoção de pequenas espessuras, (microusinagem em superfície), lembrando que o controle do ângulo e qualidade das paredes são fatores difíceis de obter através dessa técnica. Na busca de melhores resultados são utilizadas corrosões anisotrópicas. Por exemplo, o hidróxido de potássio (KOH) corrói o silício preferencialmente nas direções cristalográficas.

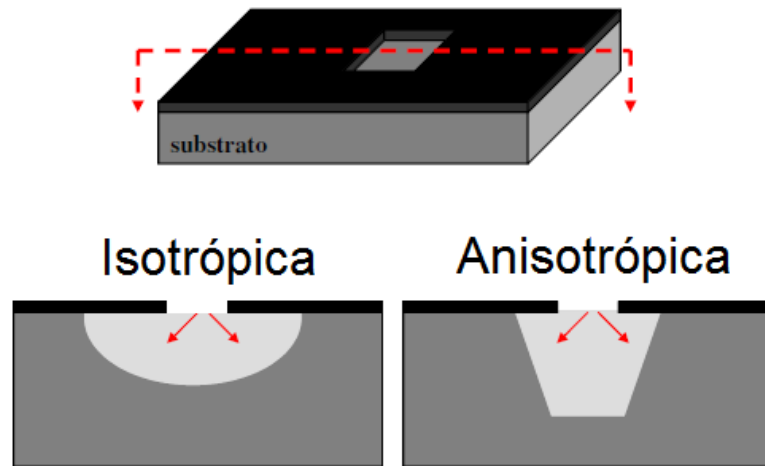


Figura 13: Corrosão úmida isotrópica (mesma propriedade física independente da direção considerada) e anisotrópica (certas propriedades físicas variam conforme a direção) [6]

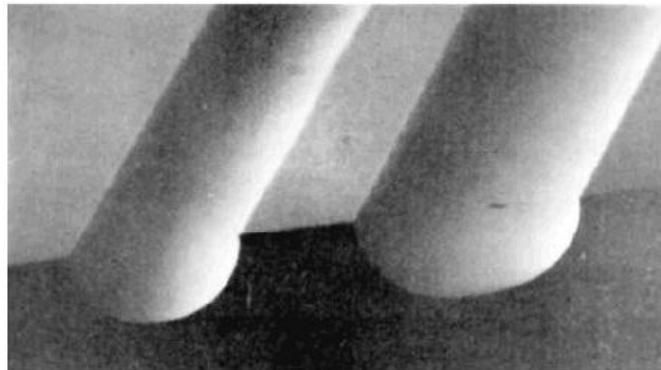


Figura 14: Imagem de microscopia eletrônica corrosão úmida isotrópica [11]

2.5.4.2 Corrosão seca

O processo a seco utiliza o plasma, que é um gás parcialmente ionizado, e consiste em expor a superfície a esse gás. As partes onde não se deseja corroer são cobertas com uma máscara inerte à reação do plasma, por exemplo, de alumínio. Os gases mais comumente usados são o: SF_6 e Fluorocarbonos (CF_4 , CHF_3 , C_4F_8 , etc.).

Anisotrópica por RIE

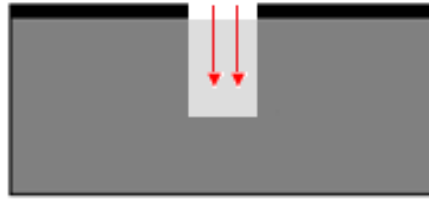


Figura 15: Corrosão por plasma através do processo RIE (corrosão iônica reativa) [6]

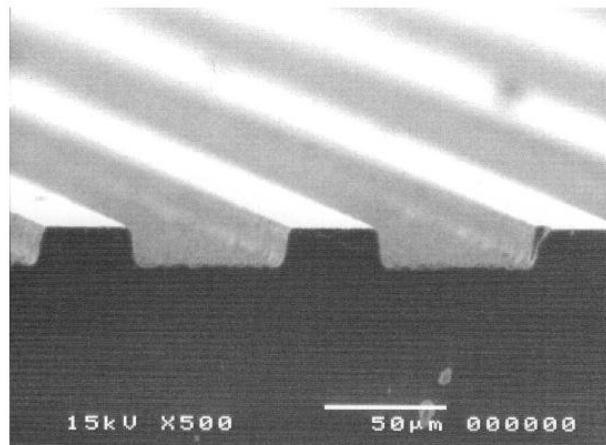


Figura 16: Imagem de microscopia eletrônica de uma corrosão por plasma RIE [10]

Ambas as técnicas tem sido muito usadas na fabricação de giroscópios comerciais, utilizando o silício policristalino como material estrutural, facilitando a integração com a eletrônica. Porém o uso dessas técnicas tem seu desempenho limitado e não atingem valores desejados para aplicações de grau inercial.

2.5.4.3 DRIE

Para a microusinagem em volume é utilizado uma técnica mais avançada, conhecida como DRIE (*Deep Reactive Ion Etching*), corrosão profunda a seco que é feita através de um reator de plasma com acoplamento indutivo. Comparado aos processos anteriores o DRIE proporciona elevadas taxas de corrosão vertical no silício, ótimo controle no ângulo, paredes com baixa rugosidade que é um fator predominante em dispositivos dotados de movimento no plano do chip, entre outras vantagens.

Em termos de hardware o DRIE diferencia-se dos equipamentos convencionais de corrosão por plasma nas seguintes características:

- plasma de alta densidade (devido ao acoplamento indutivo);
- separação física da lamina do plasma principal;
- baixa pressão e alto fluxo de gases;
- temperatura baixa, uniforme e bem controlada do substrato.

Estas condições permitem um ótimo desempenho da técnica em microfabricação.

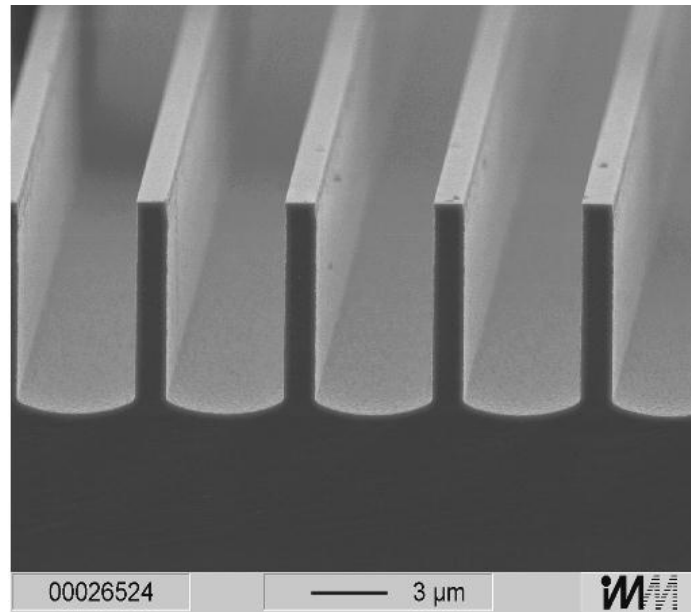


Figura 17: Imagem de microscopia eletrônica de corrosão por DRIE [10]

Um processo muito conhecido e utilizado baseado em corrosão profunda de silício é o “processo Bosch”, que consiste em etapas de corrosão (SF_6) e passivação (C_4F_8).

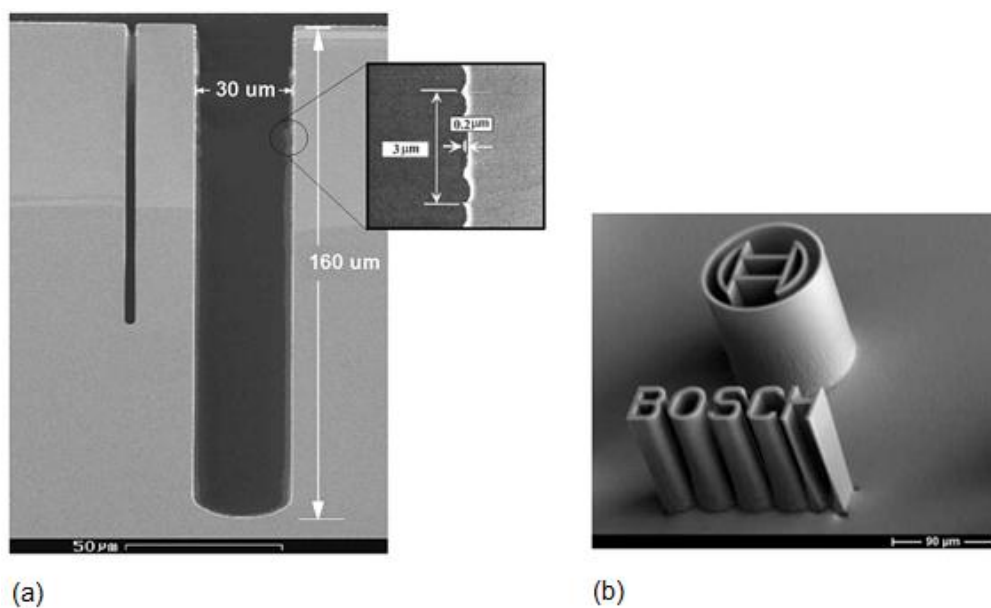


Figura 18: (a) Imagem de microscopia eletrônica de corrosão DRIE “processo Bosch”, (b) Logomarca BOSCH esculpida em silício [9]

2.6 Características do Giroscópio Tipo Diapasão (TFG)

O diapasão (*tuning fork*) é um dispositivo puramente mecânico, geralmente utilizado na afinação de instrumentos. Quando estimulado (com uma pancada em uma de suas duas hastes) ele vibra em sua frequência de ressonância, na mesma direção, porém em oposição de fase, como ilustrado na figura 19.

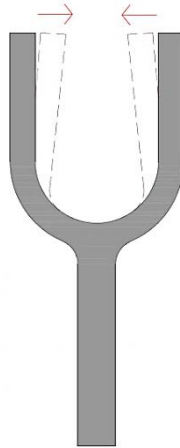


Figura 19: Diapasão [fonte própria]

O giroscópio MEMS abordado nesse trabalho é um TFG (*tuning fork gyro*), que recebe esse nome por possuir duas estruturas que oscilam de modo idêntico ao dispositivo citado acima. Cada giroscópio simétrico e desacoplado possui uma massa de prova (M_p) com dois graus de liberdade, suspensas do sistema de atuação e detecção por molas.

A representação simplificada de uma estrutura massa oscilante pode ser feita por um sistema massa-mola com atrito, conforme a figura 20.

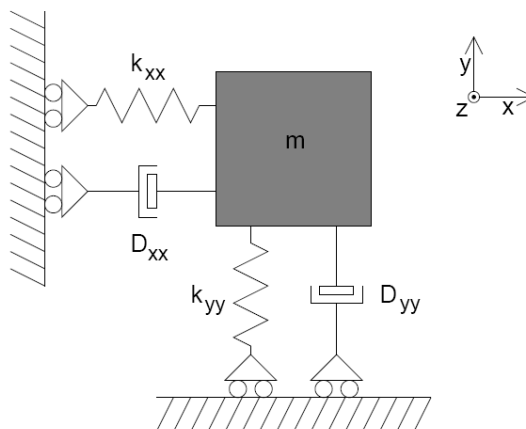


Figura 20: Representação de um oscilador mecânico com dois graus de liberdade, onde K_{xx} e K_{yy} representam as constantes de mola e D_{xx} e D_{yy} de atrito [1]

Considerando um desacoplamento mecânico ideal observa-se que quando a massa m se desloca na direção do eixo x , os coeficientes de mola (K_{yy}) e de atrito (D_{yy}) não atuam e vice-versa. Na figura as “rodinhas” desempenham esse papel.

Desconsiderando-se a massa de ambas as molas, podemos representar o sistema da seguinte maneira:

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = F \quad (9)$$

Onde m , D , k são as matrizes da massa, constante de atrito e mola respectivamente. F é o vetor da força de excitação para atuação do sistema e os termos x e y expressam o deslocamento do oscilador nas respectivas direções.

A figura 21 exemplifica de forma mais completa uma estrutura de um giroscópio diapasão contendo as duas Mps, onde as partes em vermelho são fixas (ancoradas ao substrato) e em cinza as partes móveis.

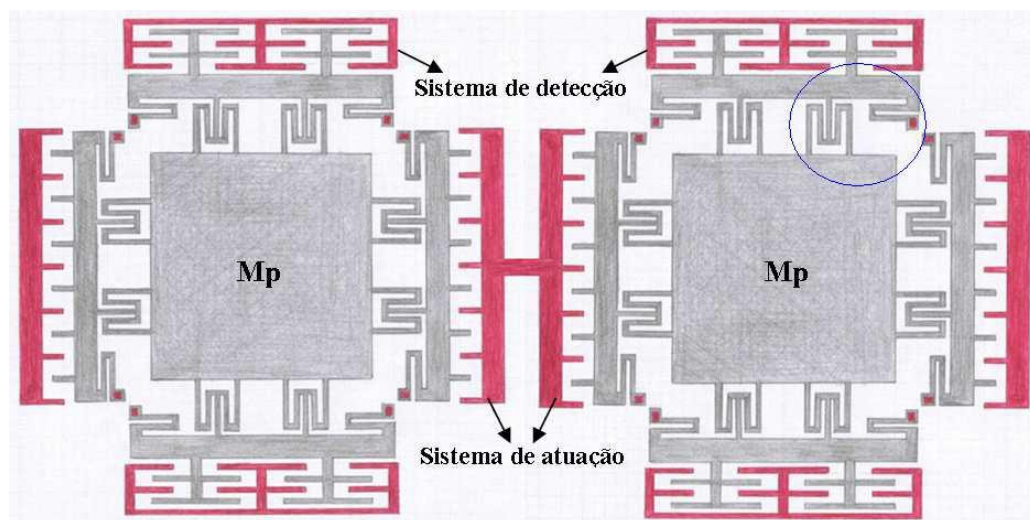


Figura 21: Estrutura TFG simétrica e desacoplada [1]

No modo de atuação as duas Mps oscilam de forma a se movimentarem na mesma direção (eixo x) e sentidos opostos, o que caracteriza o nome “diapasão”.

No detalhe da figura anterior podemos observar o sistema de “suspensão” composto por barras flexíveis, de modo a permitir grandes deflexões lineares (direção x ou y) reduzindo o acoplamento mecânico entre os modos. (figura 22).

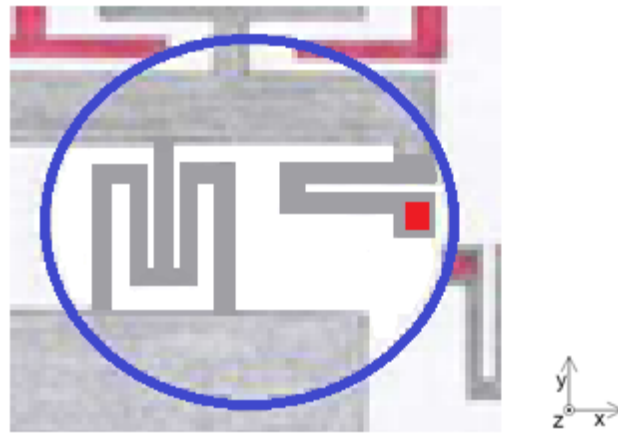


Figura 22: Sistema de suspensão [1]

As barras flexíveis atuam como molas mecânicas e são dispositivos que armazenam energia. Em conjunto com a inércia das massas móveis, atrito e o gás do entorno a estrutura representa um sistema de segunda ordem, tanto para o modo atuador como sensor.

As Mps estão suspensas sobre o substrato e ligadas ao sistema eletrostático de atuação através de molas em ambos os lados. Na direção de atuação essas molas são rígidas o suficiente para empurrá-las durante o movimento oscilatório. Ao mesmo tempo, no mesmo plano e na direção detectora são flexíveis para o movimento.

Da mesma maneira as Mps estão ligadas por molas ao sistema de detecção, dessa vez rígidas na direção detectora permitindo o dispositivo oscilar no segundo modo de vibração através do efeito de Coriolis.

Os sistemas de atuação e detecção por sua vez, estão ligados a regiões ancoradas ao substrato por barras flexíveis permitindo o movimento em apenas uma direção, respectivamente.

A estrutura em si pode ser compreendida como um ressonador mecânico atuado em sua frequência de ressonância (modo atuador), desacoplado mecanicamente do segundo modo de vibração, que é composto por um mecanismo responsável pela detecção da aceleração de Coriolis em resposta a rotação ocorrida em torno do eixo perpendicular ao plano de oscilação.

Resumindo, no giroscópio MEMS tipo diapásão, as Mps são fisicamente ligadas ao atuador e detector do dispositivo, mas pelas propriedades das barras flexíveis os modos são desacoplados entre si, evitando por exemplo o *crosstalk*, responsável pelo sinal de saída na ausência de rotação.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho foi de caráter teórico, sendo caracterizado como uma pesquisa descritiva e experimental sobre giroscópio MEMS do tipo diapasão.

Baseado nas literaturas sobre o tema foi feito um estudo da tecnologia, apresentando uma abordagem das principais características construtivas e sobre o funcionamento do dispositivo.

3.1 Modelagem Matemática

De posse das equações que descrevem o comportamento do giroscópio foi elaborado uma modelagem matemática do dispositivo para posterior simulação através de softwares, permitindo estudar o comportamento transiente das soluções matemáticas do modelo.

Foi considerado que o giroscópio opera na sua frequência de ressonância em ambos o modos (sensor e atuador). Para o fator de amortecimento das oscilações foi atribuído valores entre 0 e 1 ($0 < \xi < 1$).

Admitindo tais características e considerando a ação de uma velocidade de rotação externa Ω , constante e muito menor que ω_0 , podemos descrever as equações diferenciais que regem o dispositivo para pequenas oscilações ao longo das direções x e y conforme:

$$\begin{cases} \ddot{y} + 2\xi\omega_0\dot{y} - \omega_0^2 y = -2\dot{x}\Omega \\ \ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = 2\dot{y}\Omega + A\sin(\omega_0 t) \end{cases} \quad (10)$$

Onde A é a amplitude da aceleração imposta pelo sinal elétrico $V(t)$.

Desta forma obtêm-se então um sistema de duas equações diferenciais acopladas. Nota-se este fato pela presença de uma parcela de $\dot{x}$ na equação de $\ddot{y}$ e vice-versa.

As equações acima descrevem o comportamento de um giroscópio simétrico simples, sendo desconsiderados alguns possíveis efeitos não-lineares causados pela geometria da estrutura.

Analisando a equação do modo *sense*, onde:

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_0\dot{y} - \omega_0^2 y = -2\dot{x}\Omega \quad (11)$$

Considerando que Ω admite valores relativamente pequenos ($\Omega \ll \xi\omega_0$) podemos desconsiderar a parcela de $\dot{x}$ na equação 12, obtendo:

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_0\dot{y} - \omega_0^2 y = f(t) \quad (12)$$

Onde $f(t)$ é uma função forçante (função de excitação)

Resolvendo para $f(t)=0$:

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_0\dot{y} - \omega_0^2 y = 0 \quad (13)$$

$$y^2 + 2\xi\omega_0 y - \omega_0^2 = 0 \quad (14)$$

Para $\xi \ll \omega_0$ (muito menor):

$$\Delta = -4\omega_0^2 \quad (15)$$

$\Delta < 0$: sistema sub-amortecido, apresenta duas raízes complexas conjugadas do tipo:

$s = \alpha \pm j\beta$, onde α e β são números reais e a constante de tempo do sistema é:

$$\tau = \frac{1}{\alpha} \text{ [Unidade de tempo]} \quad (16)$$

Obtêm-se então as raízes de y (equação 17) e a constante de tempo (equação 18) do sistema respectivamente:

$$y = -\xi\omega_0 \pm j\omega_0 \quad (17)$$

$$\tau = \frac{1}{\xi\omega_0} \quad (18)$$

Assim a equação para o modo sensor pode ser escrita em função de t:

$$y(t) = Y_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \phi_y) + M \cdot e^{-\xi \omega_0 t} \cdot \cos(\omega_0 t + \phi_y) \quad (19)$$

Onde Y_0 é a amplitude de *sense* e representa o valor de regime permanente e M é a constante da parcela exponencial que representa o transiente.

Resolvendo as equações diferenciais, pôde-se encontrar não só a constante de tempo, mas também os valores em que as oscilações do *sense* atingem o ponto de máximo (equação 20) e a velocidade de rotação neste ponto (equação 21), mostrados no gráfico da figura 23.

$$Y_{0 \text{ máx}} = \frac{A}{4\xi \omega_0^2} \quad (20)$$

$$\Omega_{\text{máx}} = \xi \omega_0 \quad (21)$$

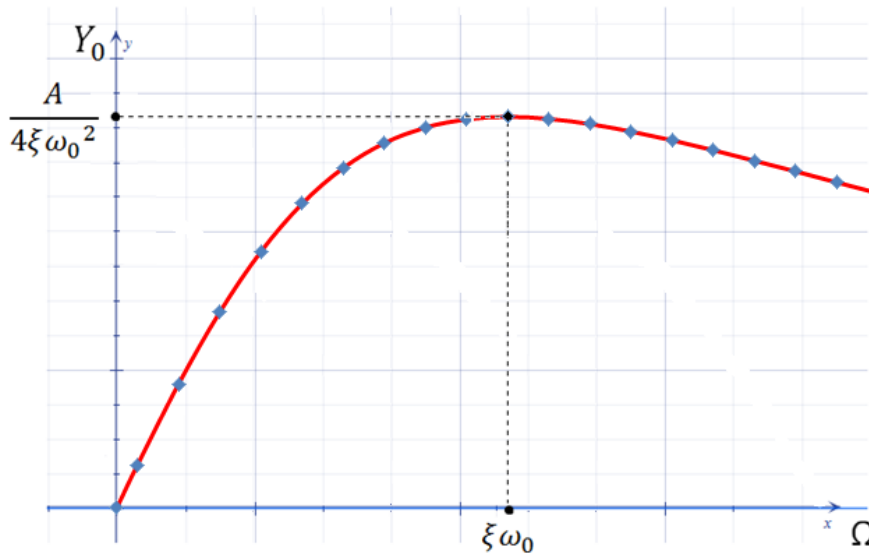


Figura 23: Ponto de máximo do *sense* e velocidade de rotação angular no ponto de máximo. [fonte própria]

Posterior às simulações os valores coletados nos gráficos foram comparados com os valores calculados, permitindo analisar o grau de precisão do modelo elaborado.

3.2 Software Para Simulação

A implementação do modelo matemático foi elaborada através do software MATLAB, que provê um ambiente numérico computacional robusto, proporcionando soluções aos mais diversos problemas científicos e de engenharia. Mais especificamente, para simular e analisar o comportamento do sistema dinâmico do giroscópio foi utilizado o aplicativo Simulink, próprio para construção de modelos a partir de diagramas de blocos.

3.2.1 Modelos matemáticos

Baseado nas equações diferenciais acopladas foi desenvolvido o primeiro modelo matemático. Basicamente foram utilizados blocos de adição, multiplicação, ganho e integradores resultando em um típico sistema massa mola. A figura a seguir ilustra as características construtivas do modelo em diagramas de blocos.

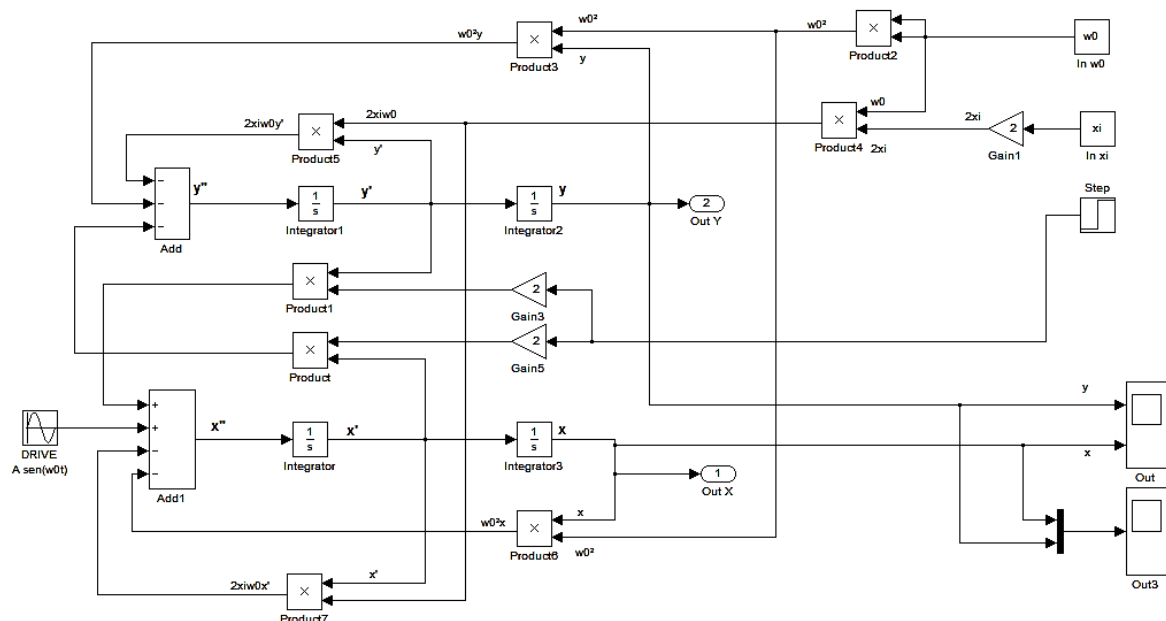


Figura 24: Modelo de simulação para duas equações de segunda ordem acopladas [fonte própria]

O giroscópio MEMS tipo diapasão possui duas Mps que operam em oposição de fase, portanto, para as simulações foi considerada apenas uma das Mps, visando tornar

mais simples a análise dos resultados, uma vez que ambas se comportam de maneira análoga.

Inicialmente foram adotados valores eventuais para teste e validação do modelo, visando verificar se as respostas correspondiam ao esperado.

Para as simulações posteriores foram usados valores constantes pré-estabelecidos, obtendo desta forma uma resposta oscilatória no tempo, composta por um transiente seguido de um valor de acomodação.

O transiente compreende o tempo desde o início da simulação até o momento em que a oscilação atinge seu valor de “regime”. Considera-se o valor de regime quando o pico da amplitude de oscilação estabiliza em um determinado valor conforme ilustração a seguir.

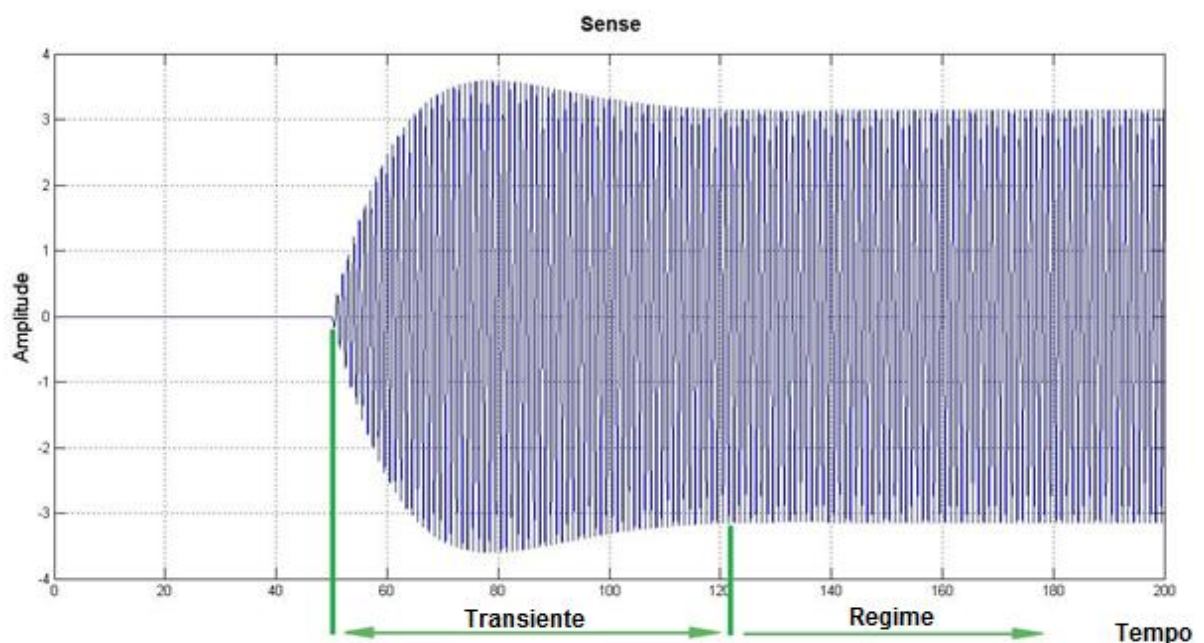


Figura 25: Tempo transiente e regime [fonte própria]

Neste trabalho foi adotado o critério 3τ (três constantes de tempo) para obtenção do valor de regime permanente, ou seja, quando atinge 95% do valor de acomodação.

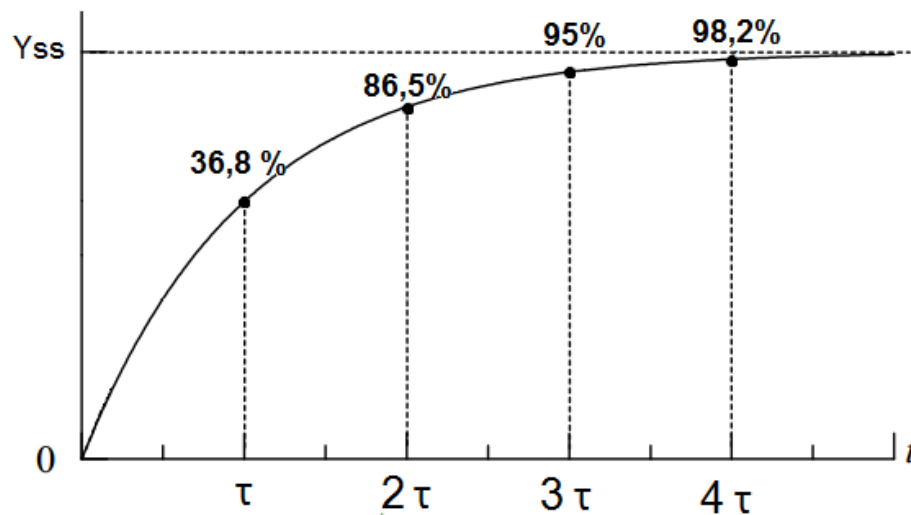


Figura 26: Percentual para constante de tempo adotada [15]

Verificado o correto funcionamento do modelo implementado foi iniciado a busca de resultados numéricos. Os principais parâmetros coletados foram o tempo transiente do dispositivo e a amplitude de oscilação do modo sensor e atuador, dados que caracterizam o desempenho do giroscópio.

3.2.2- Simulação

Os parâmetros informados para o modelo no momento da simulação foram os seguintes:

$-\omega_0$: Frequência natural de oscilação; Foi estabelecido o valor de 2π [rad/s], valor onde o período (tempo para se completar um ciclo) é igual a 1 [Unidade de tempo].

$-\xi$: Fator de amortecimento; Constante adimensional, adotado o valor de 0,01. Embora em giroscópios reais esse valor admita valores bem menores, mencionados pelo fator de qualidade $Q = 1/(2\xi)$. (Tipicamente $Q = 10000$)

$-\Omega$: Velocidade de rotação externa. [rad/s]; Neste parâmetro foram inseridos valores percentuais de $\xi\omega_0$, através de um fator multiplicativo M . ($\Omega = M\xi\omega_0$)

$-A$: Amplitude de excitação do modo *drive*; Foi adotado um valor constante de 5 [unidade de tensão].

Visando obter resultados da forma mais eficiente possível foi adotada uma ordem de simulação. Primeiramente o modo atuador foi excitado através de uma fonte $V(t) = A \sin(\omega_0 t)$, através do bloco Sine Wave da classe Sources.

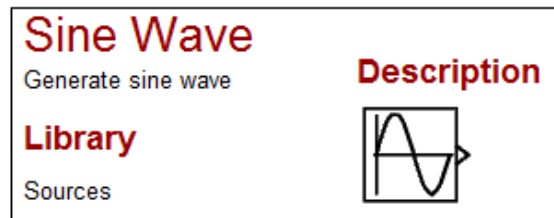


Figura 27: Bloco *Sine Wave*, responsável por excitar o modo atuador do giroscópio [16]

Quando o modo atuador atinge o regime permanente inicia-se a simulação da velocidade de rotação externa Ω . Para obtenção deste ponto foi utilizado um bloco da classe *Logic and Bit Operator*, o *Interval Test*, que monitora o momento que as oscilações do *drive* atingem o regime.

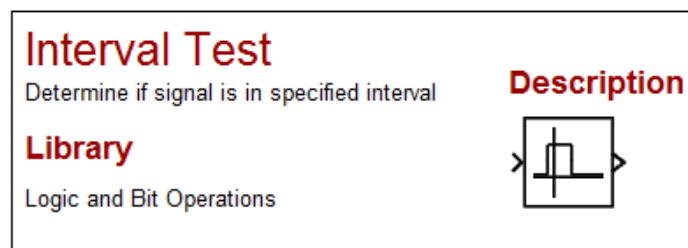


Figura 28: Bloco *Interval Test* da classe *Logic and Bit Operations* [16]

O mesmo bloco foi utilizado também para informar o momento que modo sensor do dispositivo atinge o regime, permitindo a obtenção do tempo de transiente do *sense*.

Outro bloco utilizado para facilitar a aquisição dos dados foi o *Abs* (*Absolute*), que tem por função calcular o módulo, no caso de oscilações trabalhar somente com a parte positiva do sinal.

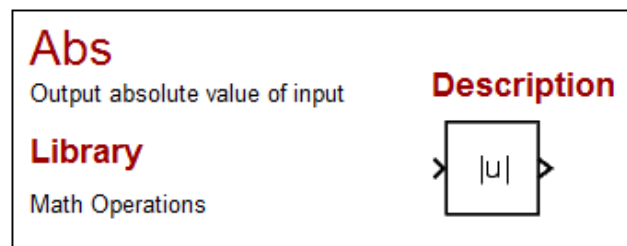


Figura 29: Bloco *Abs* da classe *Math Operations* [16]

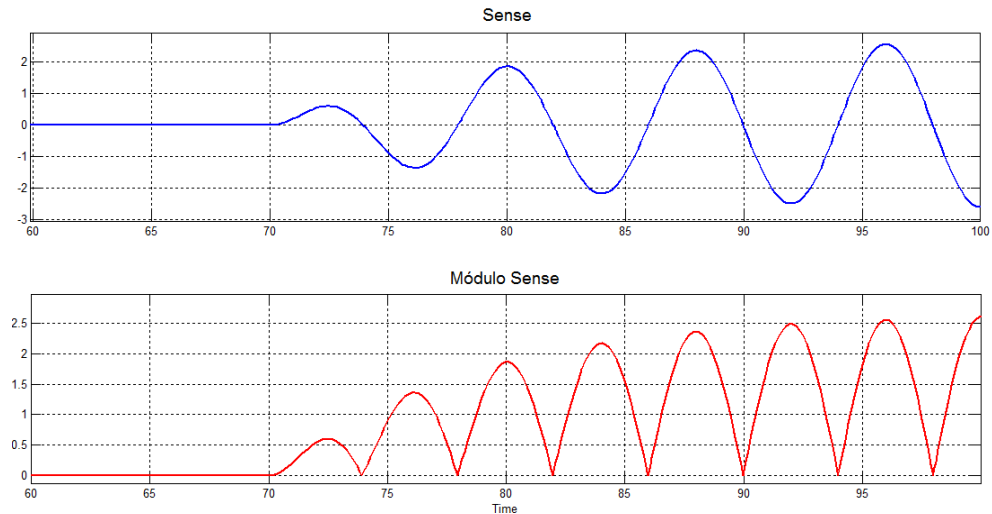


Figura 30: Exemplo de aplicação do bloco de módulo Abs [fonte própria]

O fato de adotar critérios para simulação onde algumas respostas dependem de determinadas condições iniciais (por exemplo: a simulação da rotação externa só é iniciada depois que o modo atuador atinge o regime permanente) originou a necessidade de criar vários modelos, simulados em cascata e coordenados por uma rotina (script) criada no próprio MATLAB.

Os resultados obtidos foram coletados através de gráficos plotados em resposta ao modelo desenvolvido. Também foram utilizados métodos matemáticos na rotina de execução do software (laços for, if, etc.) visando adquirir de respostas numéricas precisas. Posteriormente os dados foram tabelados e os resultados finais expostos em forma de gráfico, permitindo uma melhor análise.

4 RESULTADOS

4.1 Validação do Modelo

Inicialmente o modelo implementado passou por uma etapa de validação, ou seja, foram admitidos valores arbitrários para verificar as respostas do mesmo.

Atribuindo um valor de excitação $V(t) = A \sin(\omega_0 t)$ ao modo *drive* e o valor 0 (zero) para a entrada de velocidade de rotação externa, obteve-se uma oscilação composta por um transiente seguida de um valor de regime no *drive* enquanto o modo *sense* manteve-se em repouso absoluto, demonstrando estar totalmente desacoplado conforme ilustra a figura 31.

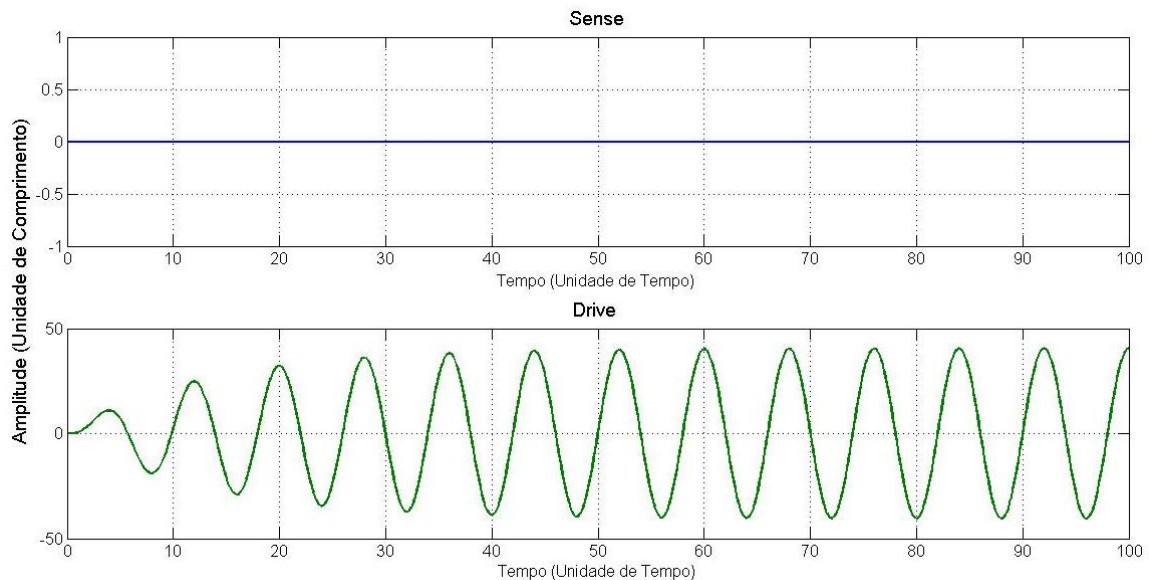


Figura 31: Resposta para velocidade de rotação Ω igual a zero [fonte própria]

Em um segundo momento manteve-se o valor de excitação no atuador e aplicou-se um valor para a velocidade de rotação externa (consideravelmente menor que ω_0).

Para este caso, o *drive* se comportou de maneira idêntica ao anterior e como o esperado surgiu uma oscilação no segundo modo do giroscópio, demonstrando que o *sense* está respondendo para determinada velocidade de rotação externa, conforme ilustrado a seguir.

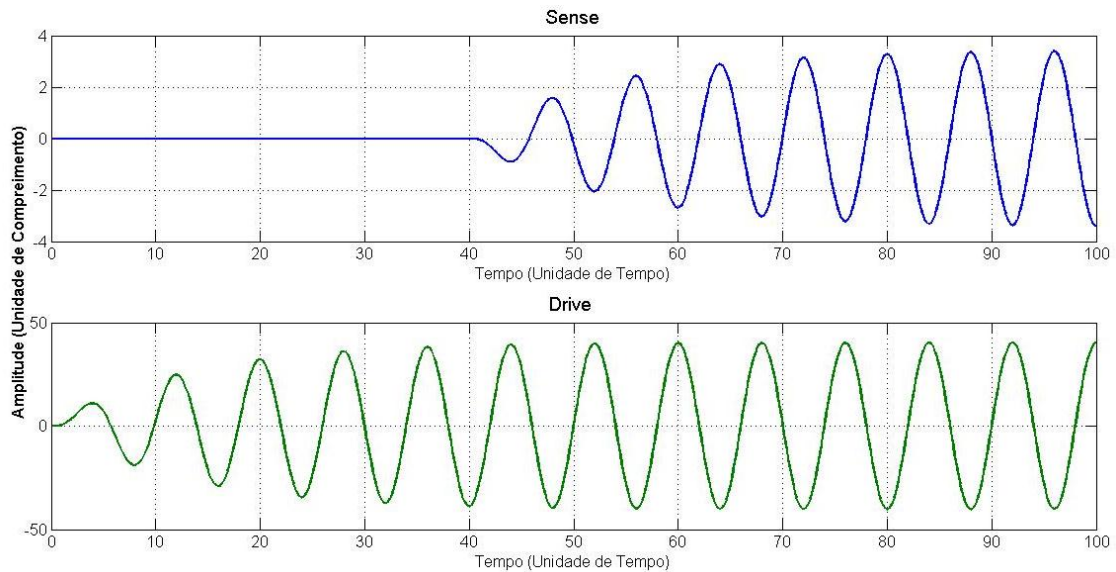


Figura 32: Resposta para velocidade de rotação $\Omega \ll \omega_0$ [fonte própria]

4.2 Análise do Fator de Amortecimento ξ

Conforme visto anteriormente em sistemas de segunda ordem o fator de amortecimento ξ influencia na constante de tempo de forma inversamente proporcional, (equação 18). Para verificar este comportamento o modelo foi simulado para diversos valores de ξ .

Segue os resultados obtidos na tabela 1 e no gráfico da figura 33.

Tabela 1: Tempo transiente versus fator de amortecimento ξ [fonte própria]

ξ	Tempo Transiente [Unidade de Tempo]	
	Obtido na simulação	Calculado (3τ)
0,005	94	95,5
0,008	58,5	59,6
0,01	47	47,7
0,02	23,5	23,9
0,03	16	15,9
0,06	8,1	7,9
0,09	5,5	5,3

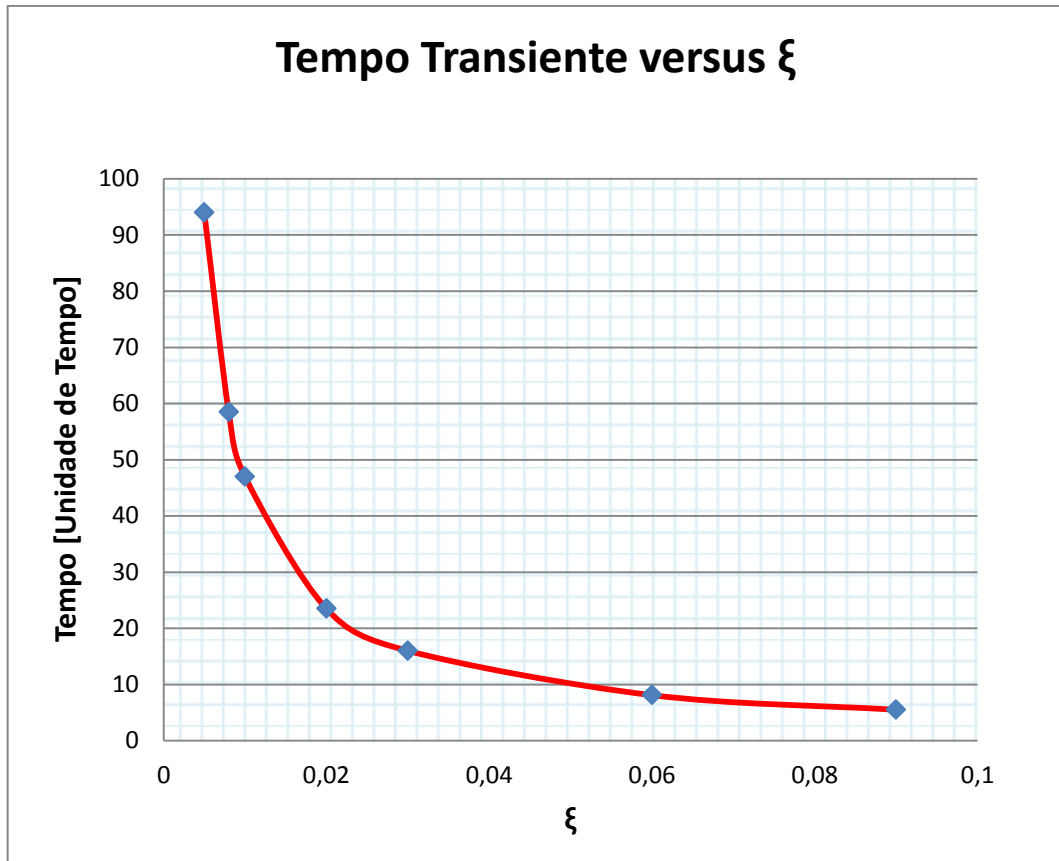


Figura 33: Gráfico do tempo transiente versus fator de amortecimento ξ [fonte própria]

A resposta é conforme o esperado e no gráfico a seguir observa-se que quanto maior o valor de ξ , menor o tempo transiente. É importante destacar que o valor obtido em simulação é muito próximo do valor calculado, mostrando a precisão do modelo desenvolvido.

4.3 Comportamento do Modo *Sense*

Retomando o conceito da amplitude máxima de *sense* e do valor de velocidade de rotação externa máxima (equações 20 e 21) e calculando para os valores simulados obtemos:

$$Y_{0 \text{ máx}} = \frac{A}{4\xi\omega_0^2} = \frac{5}{4*0,01*2\pi^2} = 3,167 \text{ [unidades de comprimento]}$$

$$\Omega_{\text{máx}} = \xi\omega_0 = 0,01 * 2\pi = 0,0628 \text{ [rad/s]}$$

É de interesse o comportamento do giroscópio até o momento em que a amplitude de sense atinge seu valor máximo, ou seja, quando a rotação Ω atinge o valor máximo em $\xi\omega_0$, contudo foram realizadas simulações para valores superiores a faixa útil do dispositivo, a caráter exploratório.

Com eficiência os valores calculados foram obtidos, e seguem na tabela 2 e no gráfico da figura 34.

Tabela 2: Amplitude de sense Y0 versus velocidade de rotação externa Ω [fonte própria]

M [Fator multiplicativo]	$\Omega = M \cdot \xi \cdot \omega_0$ [rad/s]	Y0 [Unidade de comprimento]
0,05	0,0031415	0,316
0,1	0,006283	0,627
0,2	0,012566	1,218
0,3	0,018849	1,743
0,4	0,025132	2,184
0,5	0,031415	2,533
0,6	0,037698	2,794
0,7	0,043981	2,975
0,8	0,050264	3,089
0,9	0,056547	3,149
* 1	0,06283	3,167
1,1	0,069113	3,152
1,2	0,075396	3,114
1,3	0,081679	3,06
1,4	0,087962	2,995
1,5	0,094245	2,923
1,6	0,100528	2,846
1,7	0,106811	2,768
1,8	0,113094	2,688
1,9	0,119377	2,61
2	0,12566	2,533

* Na linha em vermelho da tabela 2 se encontram os pontos de máximo de $Y_{0\text{ máx}}$ e $\Omega_{\text{máx}}$.

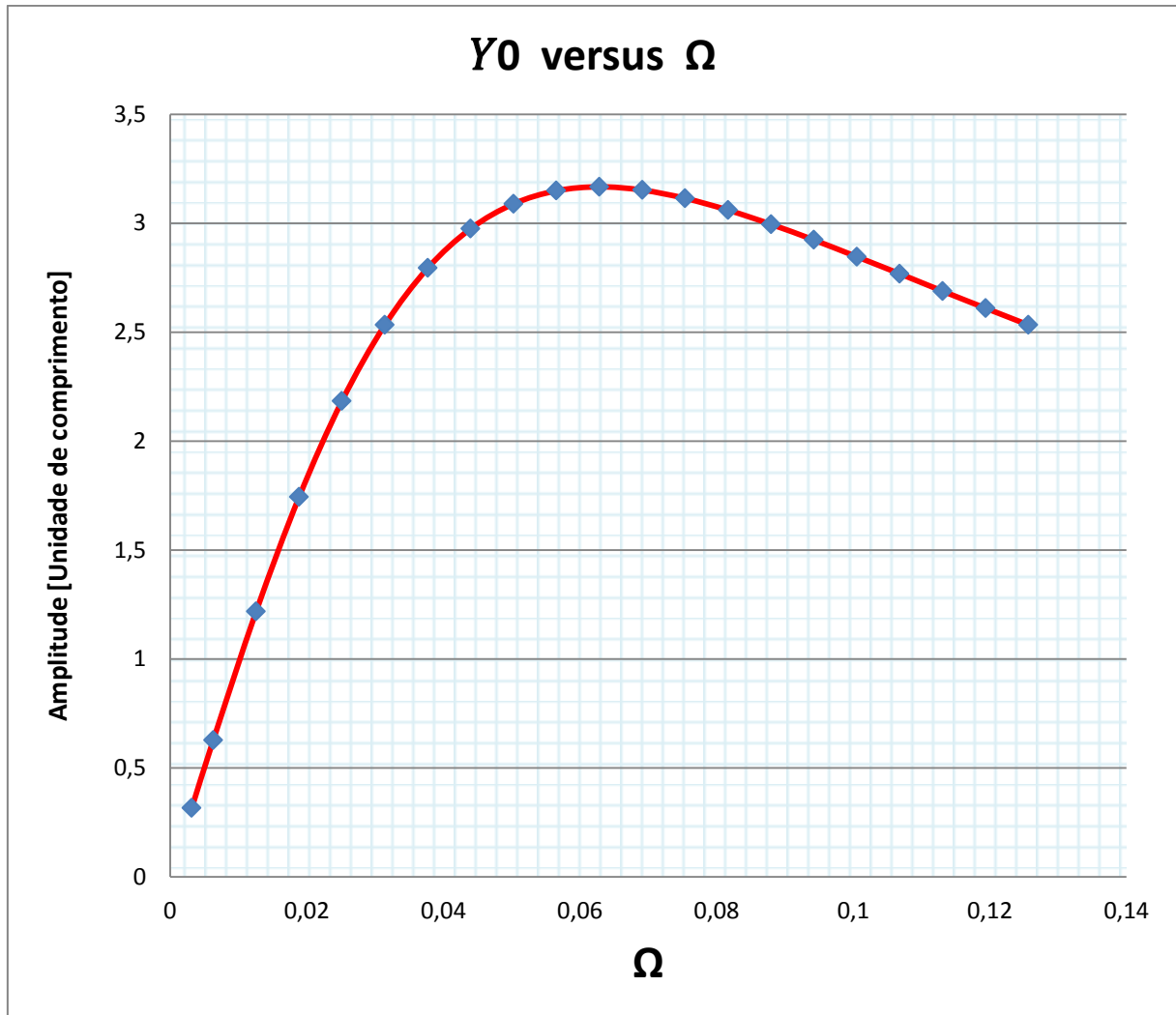


Figura 34: Gráfico da amplitude de *sense* Y0 versus velocidade de rotação externa Ω [fonte própria]

4.4 Comportamento do Modo *Drive*

A aceleração de Coriolis sobre o *sense* aumenta junto com Ω , fazendo com que a aceleração resultante no *drive* diminua e consequentemente sua amplitude sofra alterações. Para melhor explicar esta relação foi levantada a curva de variação da amplitude de *drive* X_0 versus Ω ilustrados na tabela 3 e no gráfico da figura 35.

Dentro da faixa útil do dispositivo (da região linear até o ponto de máximo) é possível observar uma redução de aproximadamente 50 % no valor da amplitude do *drive* com o aumento de Ω , demonstrando o quanto o mesmo é afetado para estas condições.

A figura 36 ilustra essa situação com mais clareza.

Tabela 3: Amplitude de *drive* X0 versus velocidade de rotação externa Ω [fonte própria]

M [Fator Multiplicativo]	$\Omega = M \cdot \xi \cdot \omega_0$ [rad/s]	X0 [Unidade de comprimento]
0,05	0,0031415	6,317
0,1	0,006283	6,27
0,2	0,012566	6,089
0,3	0,018849	5,81
0,4	0,025132	5,459
0,5	0,031415	5,066
0,6	0,037698	4,656
0,7	0,043981	4,25
0,8	0,050264	3,861
0,9	0,056547	3,499
1	0,06283	3,167
1,1	0,069113	2,865
1,2	0,075396	2,596
1,3	0,081679	2,354
1,4	0,087962	2,139
1,5	0,094245	1,949
1,6	0,100528	1,779
1,7	0,106811	1,628
1,8	0,113094	1,493
1,9	0,119377	1,374
2	0,12566	1,267

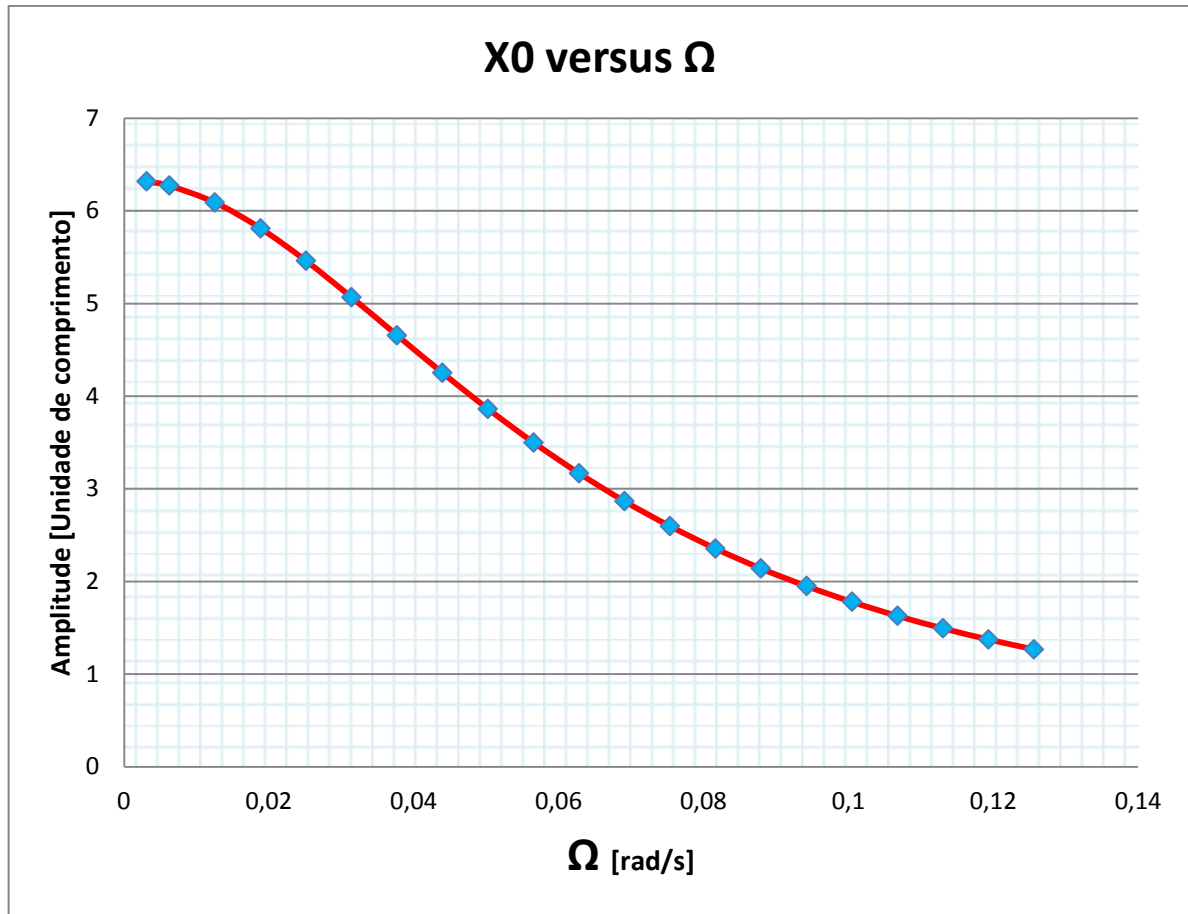


Figura 35: Gráfico da amplitude de *drive* X0 versus velocidade de rotação externa Ω [fonte própria]

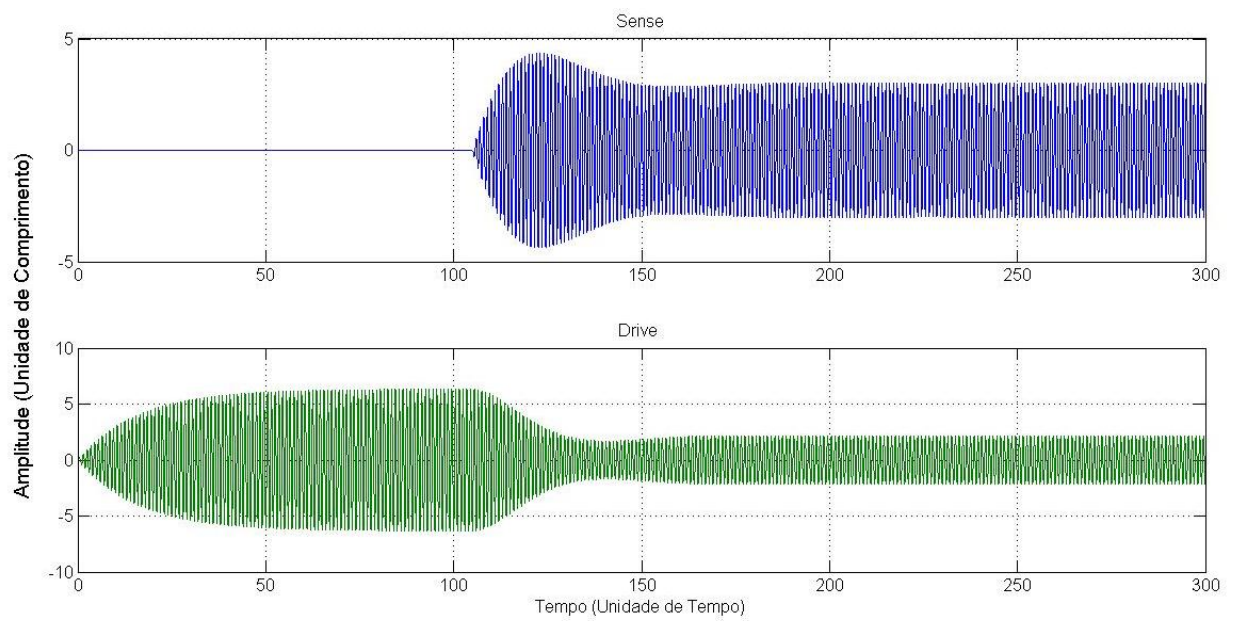


Figura 36: Comportamento do modo *drive* com aumento da velocidade de rotação externa. [fonte própria]

4.5 Tempo Transiente na Faixa Útil do Dispositivo

O tempo transiente do modo sensor do giroscópio foi coletado e segue abaixo na tabela 4 e no gráfico da figura 37. Este é um importante parâmetro que permite a obtenção da largura de faixa do dispositivo.

Tabela 4: Gráfico do tempo transiente do *sense* versus Ω [fonte própria]

M [Fator Multiplicativo]	$\Omega = M * \xi * \omega_0$ [rad/s]	Tempo Transiente do <i>Sense</i> (3τ) [Unidade de Tempo]
0,05	0,0031415	48
0,1	0,006283	47
0,2	0,012566	44
0,3	0,018849	39
0,4	0,025132	34
0,5	0,031415	29
0,6	0,037698	26
0,7	0,043981	49,5
0,8	0,050264	51
0,9	0,056547	50
1	0,06283	49
1,1	0,069113	46,2
1,2	0,075396	43,7
1,3	0,081679	41,2

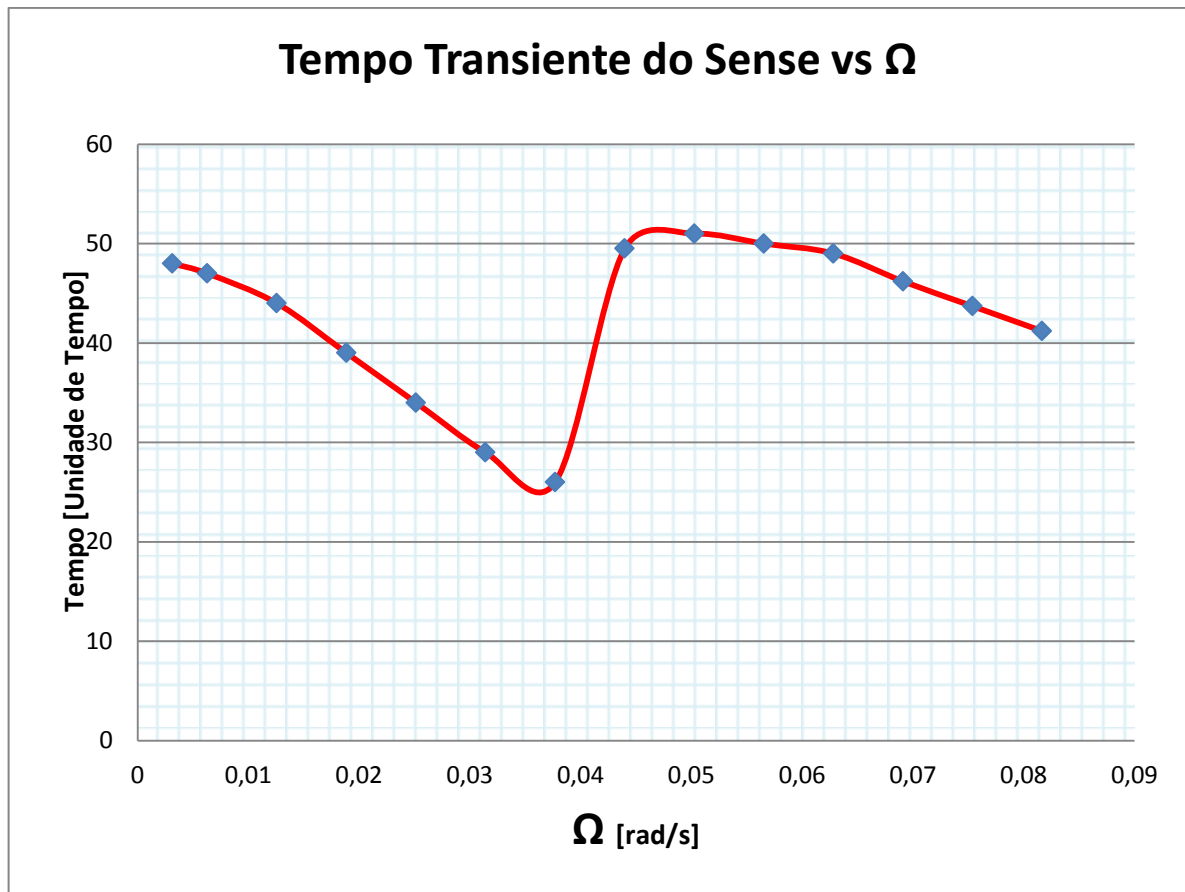


Figura 37: Gráfico do tempo transiente do sense versus Ω [fonte própria]

5 CONCLUSÃO

Este trabalho descreveu os giroscópios MEMS tipo diapasão, apresentando suas principais características de construção e princípios de funcionamento, e enfatiza que o desenvolvimento da tecnologia MEMS para aplicação em dispositivos de alto desempenho requer a utilização de processos avançados e o domínio de conhecimentos específicos.

O objetivo principal deste trabalho foi estudar as respostas de acionamento e detecção em giroscópios microfabricados em silício. O desafio foi desenvolver um modelo através de software que representasse o dispositivo da maneira mais próxima possível do seu comportamento real, visando tornar a observação dos parâmetros mais acessível e de forma “virtual”.

As análises feitas durante a coleta de resultados permitiram inferir que o software utilizado para implementação (MATLAB/Simulink) é uma excelente ferramenta para modelagem de dispositivos. Suas interfaces proporcionam um ambiente amigável e intuitivo.

Conclui-se que é bastante conveniente introduzir o uso de ferramentas computacionais nas etapas de desenvolvimento de sensores inerciais, devido à conveniência e versatilidade verificadas nos modelos implementados.

Um dos resultados mais importante é o aparente acoplamento periódico sub-ressonante entre o acionador e o sensor, que parece ocorrer quando se mede velocidades angulares comparáveis ao limite útil do dispositivo. Este efeito é particularmente relevante em aplicações espaciais, onde se deseja maximizar a sensibilidade, sem sacrifício da largura de faixa.

Destaca-se que o tema abordado nesta monografia é muito amplo. Esta pesquisa indicou a necessidade de trabalhos futuros, uma vez que evidenciou a importância dos efeitos de acoplamento entre os módulos osciladores que compõem o giroscópio tipo diapasão. A plataforma aqui descrita pode ser facilmente estendida para englobar termos não-lineares e anisotrópicos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FORHAN, Neyse Amparo Escobar. **Giroscópios MEMS**. São José dos Campos, SP: Relatório técnico-científico de pesquisa/INPE, 2009. 59 p.
- [2] HALYDAY, David. RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física: mecânica**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 8. ed., 2008. 349 p.
- [3] EIXOS do avião. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Eixos_do_avião>. Acesso em 25 mar. 2012.
- [4] SILICON Sensing. Giroscópios tipo Anel ressonante. Disponível em: <<http://www.siliconsensing.com/CRM100>>. Acesso em 04 maio 2012>.
- [5] DRAPER Laboratory. Giroscópios. Disponível em: <<http://www.draper.com/>>. Acesso em: 10 abr. 2012.
- [6] Projeto e Fabricação de Sistemas Microeletromecânicos (MEMS): Escola Politécnica/ Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia mecatrônica e de sistemas mecânicos. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr5222/>>. Acesso em: 17 mar. 2012.
- [7] MEMS Comb Drive. Photo: Micralyne DRIE etched combdrive structures. Disponível em: <<http://www.micralyne.com/news/alcateldrie/>>. Acesso em: 08 maio 2012.
- [8] IPCI Project. Internet-based Performance Centred Instruction, disponível em: <http://81.161.252.57/ipci/courses/technology/inde_376.htm>. Acesso em: 09 maio 2012.
- [9] Microfabricação em substrato II, disponível em: <[http://gnmd.webgrupos.com.br/arquivo_disciplinas_download/4-3-Corrosao-por-Plasma-\(Seca\)-2010.pdf](http://gnmd.webgrupos.com.br/arquivo_disciplinas_download/4-3-Corrosao-por-Plasma-(Seca)-2010.pdf)>. Acesso em: 09 maio 2012.
- [10] BETANZO, Claudia Reys. **Corrosão por plasma para tecnologia CMOS e microssistemas**. 2003. 166 f. Tese (Doutorado em engenharia Elétrica) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 2003. Disponível em: <http://www.ccs.unicamp.br/publicacoes/pub/teses/t_claudia.pdf>. Acesso em: 10 maio 2012.
- [11] Microfabricação em substrato I, disponível em: <http://gnmd.webgrupos.com.br/arquivo_disciplinas_download/4-2-Corrosao-Umida-2010.pdf>. Acesso em: 09 maio 2012.
- [12] GILAT, Amos. **MATLAB com aplicações em engenharia**. Porto Alegre. Bookman, 2 ed., 2006. 360p
- [13] MATSUMOTO, Élia Yathie. **Simulink 5: fundamentos**. São Paulo, SP. Érica, 2002. 204 p.
- [14] OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. São Paulo, SP: Prentice Hall, 4 ed., 2003. 788 p.
- [15] CARRARA, Valdemir. **Análise e Controle de Sistemas Lineares**, disponível em: <http://www2.dem.inpe.br/val/cursos_inpe/Carrara_controle_ap.pdf>. Acesso em 10 out. 2012.

[16] MATLAB The Language of Technical Computing. Version 7.5.0.0.342 (R2007b): The MathWorks, 2007. 1-CD-ROM.