

AMPLIFICADORES E MODULADORES UTILIZANDO MICROMECHANISMOS

Dalton L.R. Vidor^{a,b}, Paulo C. Godoy^a, Ignacio Iturrioz^b

^a*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Luterana do Brasil,
Av. Farroupilha, 8001, Bairro São José, Canoas – RS, CEP 92425-900, Brasil,
dvidor@cpovo.net, <http://www.ulbra.br>*

^b*Grupo de Mecânica Aplicada, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Rua Sarmiento Leite, 425, Bairro Cidade Baixa, Porto Alegre – RS, CEP 90050-170, Brasil,
Ignacio@mecanica.ufrgs.br, <http://www-gmap.mecanica.ufrgs.br>*

Palavras Chave: Micromecanismos, Microeletrônica, MEMS.

Resumo. Recentemente os micromecanismos (MEMS) têm sido investigados e aplicados em várias áreas da ciência. As aplicações dos MEMS em telecomunicações, instrumentação e medicina têm atraído a atenção nos últimos anos principalmente por utilizar processos de fabricação de semicondutores já conhecidos e de associar atuadores e sensores aos dispositivos eletrônicos. A análise e projeto destes dispositivos são difíceis e envolvem conhecimentos multidisciplinares. O presente trabalho irá tratar de uma aplicação em telecomunicações que é a realização de moduladores em frequência e moduladores em amplitude, além disso, verificaremos a possibilidade de utilizar o micromecanismo como amplificador de sinal. A análise do funcionamento e algumas simulações serão apresentadas, bem como uma discussão dos resultados.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de micromecanismos nos dispositivos eletrônicos vem crescendo rapidamente nos últimos anos. A possibilidade de se realizar um capacitor variável, micro chaves, indutores, filtros e sensores, além de atuadores e máquinas lineares ou rotativas, têm despertado o interesse nos profissionais das engenharias principalmente quanto a utilização em telecomunicações, bioengenharia, mecânica e instrumentação. O mercado de MEMS está na faixa dos US\$ 5 bilhões em 2005 e estima-se que chegará a US\$ 12,5 bilhões em 2010 (Electronics Industry Market Research and Knowledge, www.electronics.ca, 2006).

O projeto de tais dispositivos exige conhecimentos multidisciplinares. Conhecimentos em Engenharia de Materiais, Engenharia Mecânica, Engenharia Química e Engenharia Elétrica são fortemente requisitadas em diversas etapas que envolvem o projeto e fabricação até a utilização final.

Existem várias estruturas que são chamadas de micromecanismos. Tais estruturas, realizadas com o mesmo processo de fabricação de semicondutores e com formas variadas, realizam funções como válvulas, bombas, giroscópios, acelerômetros, chaves, etc. e são conhecidos como micromecanismos. São mecanismos que conhecemos, mas construídos em escala microscópica.

O presente trabalho utiliza uma forma já consagrada de MEMS, o Comb Drive, pois este se apresenta como um dispositivo versátil que pode ser aplicado em sensores, atuadores mecânicos e filtros (J. Wang, Z. Ren, and C. T.-C. Nguyen, 2003 e 2004; J. R. Clark, A.-C. Wong, and C. T.-C. Nguyen, 1997). A vibração ou o movimento imposto ao Comb Drive é consequência da aplicação de um campo elétrico no dispositivo. As grandezas de força e deslocamento seriam obtidas com estruturas maiores, na ordem de metros, utilizando-se campos elétricos extremamente elevados. As distâncias reduzidas permitem a utilização de baixas voltagens na produção dos campos elétricos, permitindo assim a realização dos mesmos. Alguns exemplos são apresentados na figura 1 (www.sandia.com, 2006). Na última foto da figura 1 podemos observar um ácaro sobre o Comb Drive.

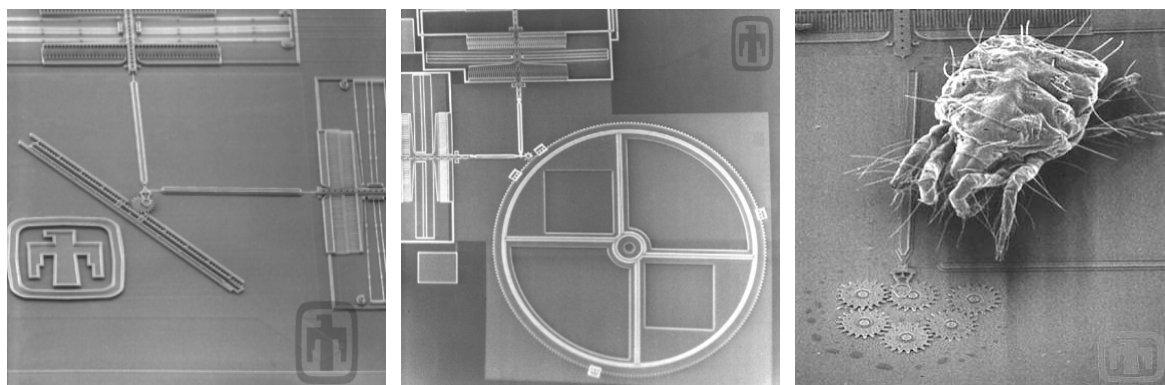


Figura 1: Implementações com Comb Drives

Nas aplicações onde os Comb Drives operam como filtros, a estrutura é modelada como um sistema mecânico do tipo massa-mola-amortecedor. Associações de Comb Drives e geometrias variadas influenciam nas frequências de ressonância ou modos de vibração e na forma de operação, podendo atuar como filtros passa-baixas, passa-faixas, passa-altas ou rejeita-faixa. Dentre as vantagens da utilização de micromecanismos como filtros está a alta seletividade encontrada. Esta característica é consequência das baixas perdas no sistema. Como resultado, pode-se realizar

dispositivos de comunicação mais seletivos e assim serem agrupados mais canais de RF (“Rádio Freqüência”) na mesma faixa.

Como o espectro de ondas eletromagnéticas utilizado é limitado, a utilização de micromecanismos é uma forma de aumentar a capacidade de canais dentro da faixa existente. Várias estruturas que compõem os rádios comunicadores estão sendo desenvolvidas utilizando-se micromecanismos (J. Wang, Z. Ren, and C. T.-C. Nguyen, 2003 e 2004; J. R. Clark, A.-C. Wong, and C. T.-C. Nguyen, 1997; K. Wang, A.-C. Wong, W.-T. Hsu, and C. T.-C. Nguyen, 1997; D. Joachim and Liwei Lin, 2003), mas observa-se a carência de dispositivos moduladores e amplificadores.

Neste artigo serão apresentados, analisados e observados os resultados de simulação de moduladores AM (moduladores em amplitude) e FM (moduladores em freqüência) utilizando micromecanismos do tipo Comb Drive. Os modos de operação, freqüências e topologias serão apresentados, uma modelagem simplificada será realizada e serão discutidos os resultados de simulação.

2 ESTRUTURAS PROPOSTAS

2.1 Modulador AM

Para realizar a função de modulador em amplitude a estrutura utilizada é o comb drive conforme apresentado na figura 2. O movimento deste é horizontal e o mesmo está fixado nas partes pretas próximo a L_a e L_s e abaixo, além das portas 1 e 2. Uma diferença de potencial é aplicada na Porta 1 a fim de produzir campo elétrico e criar a força necessária ao movimento do Comb Drive. A equação (1) apresenta as grandezas envolvidas.

$$V_{P1} = V_{cc} + V_{Modulador} + V_{Portadora} \quad (1)$$

A diferença de potencial denominada V_{P1} é formada por um potencial contínuo (V_{cc}), um potencial utilizado para modular a amplitude da portadora ($V_{Modulador}$) e o sinal da portadora ($V_{Portadora}$). Estes dois últimos sinais são considerados senoidais, conforme apresentados abaixo:

$$V_{Modulador} = A_M \text{sen}(w_M t) \quad (2)$$

$$V_{Portadora} = A_P \text{sen}(w_P t) \quad (3)$$

Onde A_M e A_P são as amplitudes de pico e w_M e w_P são as freqüências angulares dos sinais “Modulador” e “Portadora”, respectivamente.

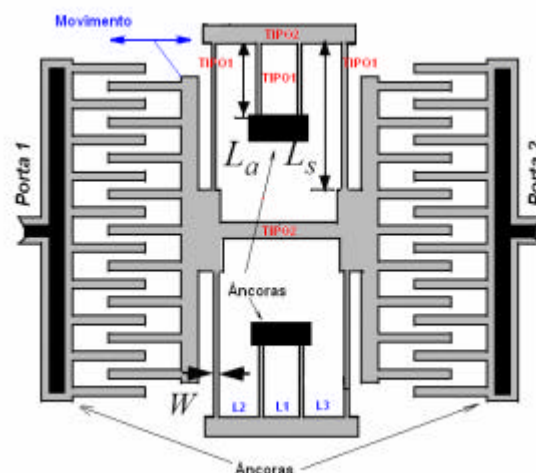


Figura 2: Modulador AM utilizando Comb Drive

O sinal modulado em amplitude é obtido na Porta 2.

2.2 Modulador FM

Para realizar a função de modulador em frequência a estrutura utilizada é o comb drive conforme apresentado na figura 3.

O seguinte sinal é aplicado na Porta 1:

$$V_{P1} = V_{CC} + V_{Modulador} + V_{Feedback} \quad (4)$$

$$V_{Modulador} = A_M \text{sen}(w_M t) \quad (5)$$

Observa-se uma diferença entre o sinal do modulador em amplitude e o modulador em frequência: a diferença de potencial $V_{Portadora}$ foi trocada por $V_{Feedback}$.

A figura 2 apresenta o Comb Drive associado aos sinais de controle. O sinal aplicado na Porta 1, conforme o diagrama, é um somatório dos sinais V_{CC} , $V_{Modulador}$ e $V_{Feedback}$. Este último sinal é obtido na Porta 2, ou seja, o sinal $V_{Feedback}$ é uma realimentação da saída.

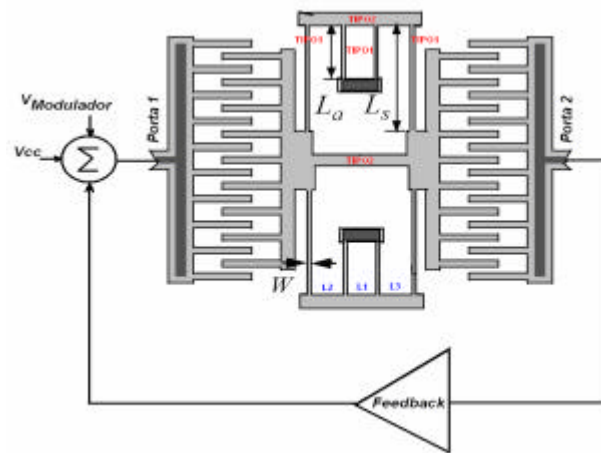


Figura 3: Modulador FM utilizando Comb Drive

O bloco *Feedback* é formado por um amplificador eletrônico analógico. A função deste dispositivo é repor as perdas provocadas pelo amortecimento e manter a vibração no Comb Drive. Vibração esta que inicia-se com distúrbios no campo elétrico, forças ou movimentos na estrutura.

3 ANÁLISE TEÓRICA

Na estrutura utilizada, as seguintes características e dimensões foram determinadas:

Tabela 1: Características utilizadas no Comb Drive.

Descrição (figuras 1 e 2)	Valor
Barras La [μm]	30
Barras Ls [μm]	32,8
Barra L1, L2 e L3 [μm]	10
W [μm]	2
Profundidade [μm]	2
Módulo de Elasticidade do Silício [N/m^2]	1,5e11
Densidade do Silício [kg/m^3]	2300
Módulo de Poisson []	0,226

O sistema Comb Drive pode ser modelado de maneira simplificada como apresentado abaixo na figura 4.

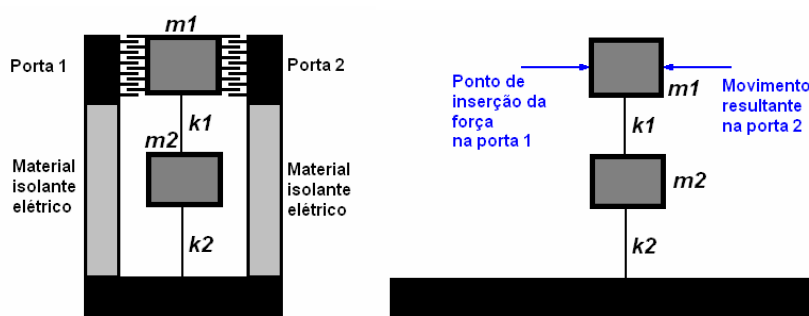


Figura 4: Modelo aproximado do Comb Drive.

O amortecimento é baixo suficiente para ser desprezado. As diferenças de potenciais aplicadas às portas 1 e 2 podem ser modelados como forças. As massas podem ser concentradas em dois blocos e as barras modeladas como molas.

4 MODOS DE VIBRAÇÃO DO COMB DRIVE

No sistema real, vários modos de vibração aparecem. Alguns modos são eliminados pela atuação de campos elétricos impostos no sistema e através das dimensões das barras, evitando assim que modos indesejáveis apareçam nas frequências de trabalho. O modo de frequência mais baixa é em geral utilizado por apresentar amplitude elevada, mas alguns autores já utilizaram modos superiores com sucesso (J. Wang, Z. Ren, and C. T.-C. Nguyen, 2003 e 2004).

4.1 Modos de vibração em baixas frequências

Utilizou-se o aplicativo Ansys (software de análise e simulação mecânica, que utiliza elementos finitos) para verificar os modos de vibração e deslocamentos em função das forças aplicadas na Porta 1. O modelo simplificado é apresentado na figura 5. As dimensões e os parâmetros de entrada são aqueles apresentadas na tabela 1.

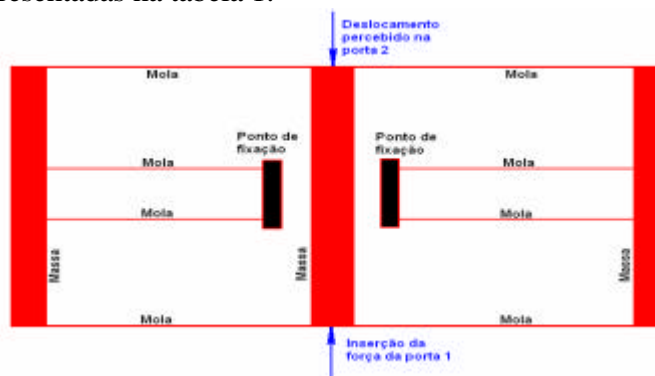


Figura 5: Modelo simplificado utilizado na simulação.

Nas figuras 6a e 6b observam-se as deformações obtidas nos modos principais de baixa frequência. Os modos 1 e 3 apresentam frequências em 349kHz e 902kHz, respectivamente. Tais valores são baixos quando comparados com as frequências de trabalho de emisoras comerciais em AM e FM. Valores maiores poderão ser obtidos com geometrias e dimensões diferentes, atingindo as faixas de operação comerciais. O segundo modo é suprimido devido às restrições impostas ao sistema.

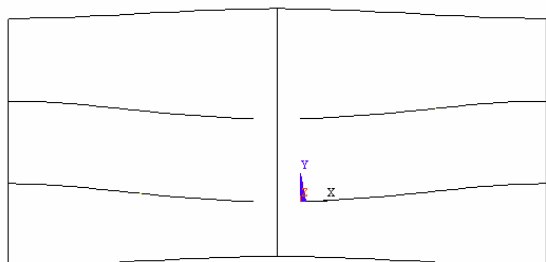


Figura 6a: Primeiro Modo

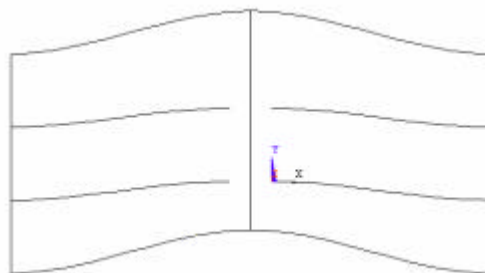


Figura 6b: Terceiro Modo

Figura 6: Modos de Vibração da Estrutura

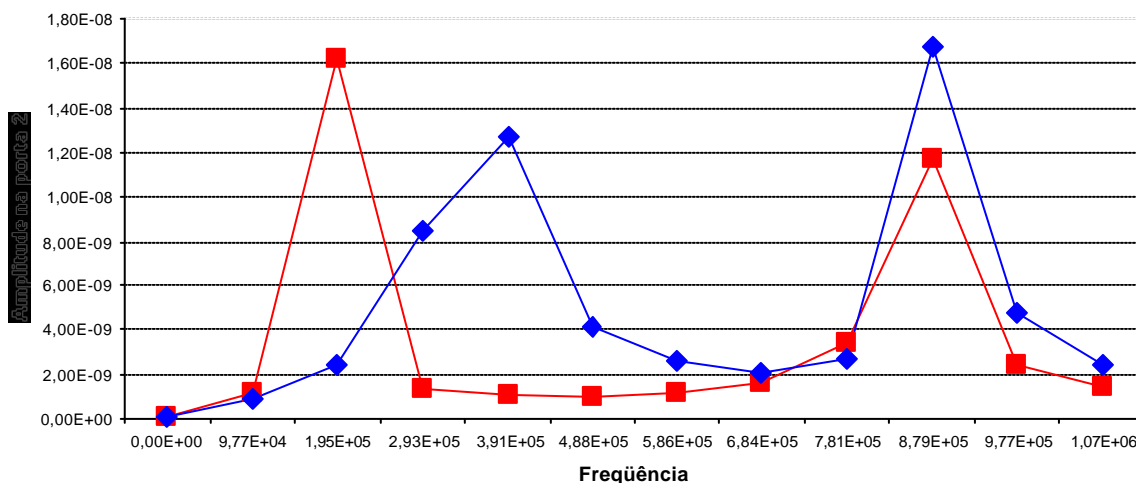
5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A partir da estrutura inserida no software de simulação implementaram-se os sinais injetados nas Portas 1 para o modulador AM e o modulador FM. Utilizou-se a opção de simulação transiente onde os resultados obtidos de deslocamentos, forças e momentos são novamente injetados no sistema considerando-os como condições iniciais para o próximo intervalo. Faz-se o intervalo pequeno o suficiente para não interferir na resposta do sistema.

No modulador AM observou-se a variação de amplitude e fase no sinal de saída. A frequência obtida na Porta 2 foi a mesma inserida na Porta 1. A variação na amplitude foi obtida a partir da variação na diferença de potencial de $V_{Modulador}$.

Já no modulador FM observou-se a variação de frequência no sinal de saída. Tal variação foi obtida a partir da alteração na diferença de potencial de $V_{Modulador}$. A realimentação foi modelada matematicamente como um amplificador que monitora a variação na carga (Coulomb) do Comb Drive da Porta 2 e a transforma em diferença de potencial aplicada na Porta 1. No caso do modulador FM a frequência obtida e os modos de vibração são dependentes apenas do sistema. Não há injeção de um sinal externo.

Na figura 6 são mostradas as frequências dos modos 1 e 3 sob influência de $V_{Modulador}$. Podemos verificar mudança nas frequências dos modos, o que caracteriza o funcionamento como modulador FM.

Figura 6: Frequências de ressonância para $V_{Modulador}=100V$ (■) e $V_{Modulador}=0V$ (◆).

Na figura 6, o gráfico em azul (♦) indica as frequências de operação nos modos 1 e 3 para $V_{Modulador}=0V$ e o gráfico em vermelho (■) indica as frequências de operação nos modos 1 e 3 para $V_{Modulador}=100V$.

A operação como modulador AM pode ser observada considerando-se uma frequência de entrada de 200kHz, por exemplo. Quando o Comb Drive está sob influência de $V_{Modulador}=100V$ a amplitude monitorada na Porta 2 é de $1,6 \cdot 10^{-8}m$. Sob $V_{Modulador}=0V$ a amplitude cai para $2 \cdot 10^{-9}m$. Esta variação na amplitude de saída que depende da tensão $V_{Modulador}$ é a característica de um modulador AM. A alteração na amplitude é provocada pela alteração na frequência dos modos de vibração.

O fator de mérito dos sistemas ressonantes é relacionado com o amortecimento que a estrutura sofre. Os micromecanismos são encapsulados em alto vácuo, assim este fator é reduzido, minimizando as perdas por atrito com o ar. Esta característica determina uma maior seletividade destes filtros.

6 CONCLUSÕES

A utilização de micromecanismos para realizar moduladores em amplitude e moduladores em frequência foi apresentada. A estrutura denominada de Comb Drive foi escolhida, modelada, avaliada através de simulações e os resultados apresentados. Testes práticos estão sendo encaminhados a fim de confirmar o que os estudos apontam até o presente momento.

A área de telecomunicações carece de dispositivos que possam substituir indutores e transformadores, pois estes apresentam-se com processos dispendiosos. O presente trabalho sugere um dispositivo que pode ser realizado através dos processos de fabricação de semicondutores e que não necessita de indutores ou transformadores para operar.

Além de vantagens em relação ao processo de fabricação e custos, o Comb Drive apresentado é mais seletivo do que os ressonadores com indutores e capacitores utilizados atualmente. Tal característica aumenta a densidade de canais de rádio frequência no espectro existente.

Este trabalho apresenta uma proposta que reduz o custo e viabiliza o aumento na densidade dos sistemas de telecomunicações.

REFERENCES

- Electronics Industry Market Research and Knowledge Network consultado em 15 de julho de 2006. site: [http://www.electronics.ca/PressCenter/categories/Electronic-Manufacturing/MEMS-Market-To-Reach-\\$12_5-Billion-In-2010.htm](http://www.electronics.ca/PressCenter/categories/Electronic-Manufacturing/MEMS-Market-To-Reach-$12_5-Billion-In-2010.htm)
- Electronics Industry Market Research and Knowledge Network consultado em 15 de julho de 2006. site: <http://www.electronics.ca/reports/mems/technology.htm>
- J. Wang, J. E. Butler, T. Feygelson, and C. T.-C. Nguyen, "1.51-GHz polydiamond micromechanical disk resonator with impedance-mismatched isolating support," Proceedings, 17th Int. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conf., Maastricht, The Netherlands, Jan. 25-29, 2004, pp. 641-644. site: www.eecs.umich.edu/~ctnguyen/publications.ctnguyen.htm
- J. Wang, Z. Ren, and C. T.-C. Nguyen, "Self-aligned 1.14-GHz vibrating radial-mode disk resonators," Dig. of Tech. Papers, the 12th Int. Conf. on Solid-State Sensors & Actuators (Transducers'03), Boston, Massachusetts, June 8-12, 2003, pp. 947-950. site:

www.eecs.umich.edu/~ctnguyen/publications.ctnguyen.htm

J. R. Clark, A.-C. Wong, and C. T.-C. Nguyen, "Parallel-resonator HF Micromechanical Bandpass Filters," Digest of Technical Papers, 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, Illinois, June 16-19, 1997, pp. 1161-1164.

www.eecs.umich.edu/~ctnguyen/publications.ctnguyen.htm

K. Wang, A.-C. Wong, W.-T. Hsu, and C. T.-C. Nguyen, "Frequency-trimming and Q-factor enhancement of micromechanical resonators via localized filament annealing," Digest of Technical Papers, 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, Illinois, June 16-19, 1997, pp. 109-112. www.eecs.umich.edu/~ctnguyen/publications.ctnguyen.htm

D. Joachim and Liwei Lin, "Characterization of Selective Polysilicon Deposition for MEMS Resonator Tuning," *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 12, pp. 193-200, 2003.