

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Avaliação do Impacto da Carga de Saída em um Gerador de Energia Baseado no Efeito Piezoelétrico

Marcos Antonio Jeremias Coelho¹

Valner João Brusamarello¹

Jeferson Vieira Flores¹

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFRGS, Porto Alegre, RS

Resumo. Neste artigo será apresentado um estudo sobre um sistema de microgeração de energia a partir de vibração utilizando gerador piezoelétrico acoplado a uma viga em balanço. O sistema foi identificado observando suas características com as seguintes cargas: puramente resistiva e não linear (retificador onda completa). Por fim, é realizada a análise da potência gerada com estas cargas acopladas à saída.

Palavras-chave. Barras Engastadas, Carga Não Linear, Identificação de Sistema, Microgeração de Energia, Piezoelectricidade

1 Introdução

A microgeração de energia através de transdutores piezoelétricos baseia-se na conversão de energia mecânica em energia elétrica. Sua utilização é uma tendência crescente em aplicações como: nós sensores [3] e alimentação de circuitos integrados MEMS [5]. Em certas aplicações ocorre a integração de geração a partir da vibração mecânica com outras fontes como, por exemplo, solar [2].

Este estudo apresenta os resultados de um microgerador de energia elétrica a partir de vibração baseado no efeito piezoelétrico acoplado a uma viga de alumínio engastada em uma de suas extremidades. Realizou-se a montagem do experimento possibilitando a variação de frequência, amplitude do estímulo e tipos de cargas utilizadas (resistiva e não linear) a fim de validar os resultados analíticos encontrados. Para melhor compreensão do sistema foi realizada a identificação dos parâmetros individuais da viga, gerador piezoelétrico, cargas e condicionamento. Os diferentes tipo de cargas foram acopladas ao gerador verificando as potências geradas e sua influência no sistema, buscando assim a melhor condição para geração de energia elétrica.

¹{marcos.coelho, valner.brusamarello, jeferson.flores}@ufrgs.br

2 Sistema de Microgeração de Energia

Neste trabalho foi considerado o arranjo experimental da Figura 1, o qual consiste de uma lâmina flexível de alumínio engastada em uma das suas extremidades a uma base fixa. Dois transdutores piezoelétricos foram fixados em cada um dos lados da lâmina junto ao engaste. Desta forma, um transdutor age como atuador controlando a vibração da estrutura, e outro como gerador de energia provida desta vibração.

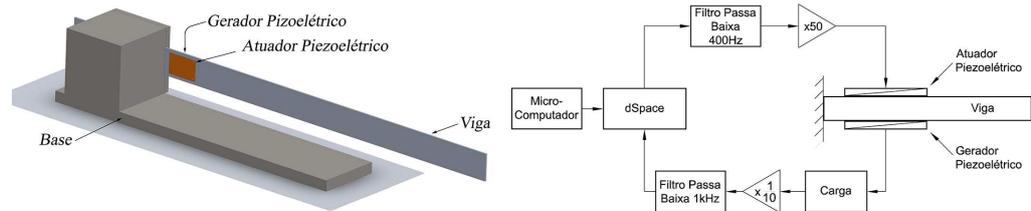


Figura 1: Estrutura Utilizada para o Gerador de Energia Baseado no Efeito Piezoelétrico.

As viga tem as seguintes características: Comprimento (L) $0.71m$, largura (W) $0.05m$, espessura (h) $0.003m$, constante de Young (E) $7 \times 10^{10}N/m^2$ e densidade de massa (ρ) $2770kg/m^3$, onde o material da viga utilizada é alumínio. Os transdutores piezoelétricos: Comprimento (L_p) $45.97mm$, largura (W_p) $33.27mm$, espessura (h_p) $0.864mm$, constante de Young (E_p) $6.7 \times 10^{10}N/m^2$, constante de tensão (g_{31}) $-11.3 \times 10^{-3}Vm/N$, constante de carga (d_{31}) $-1.9 \times 10^{-10}m/V$ e fator de acoplamento eletromecânico (k_{31}) 0.36 . O atuador piezoelétrico é do tipo QP20W e o gerador piezoelétrico é do tipo V20W, ambos do fabricante Midé [8].

Na mesma figura é apresentado o diagrama completo do experimento. Também foi utilizada uma placa de processamento de sinais e controle em tempo real (*dSpace*), para a geração do sinal de excitação e aquisição de dados. O sinal é condicionado para ser aplicado ao atuador piezoelétrico acoplado a viga. Na face oposta ao atuador tem-se o gerador piezoelétrico onde os diferentes tipo de cargas são conectados. O condicionamento projetado consiste de um filtro passa-baixas para a frequência de corte em $400Hz$, com um circuito de 1ª ordem passivo responsável pela atenuação do ruído de quantização. Com a finalidade de gerar maior deformação na viga, o atuador foi alimentado em sua máxima tensão de $\pm 200V$, conforme indicado pelo fabricante, necessitando assim de um amplificador com ganho $50V/V$ a partir de um sinal de referência. Para a aquisição do sinal gerado na carga utilizou-se um atenuador de $10x$ e um filtro passa-baixas *anti-aliasing* de segunda ordem sintonizado em $1kHz$.

2.1 Atuador Piezoelétrico Acoplado a Viga

A partir de [8] obtém-se a seguinte função de transferência que relaciona a tensão aplicada no sensor e a deflexão da viga, assumindo apenas os M primeiros modos de vibração mais significantes [4]:

$$G_{v(s)} = k_s \frac{\prod_{i=1}^M (s^2 + 2\hat{\zeta}_i \hat{\omega}_i s + \hat{\omega}_i^2)}{\prod_{i=1}^M (s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2)} \quad (1)$$

onde ζ_i e ω_i representam o coeficiente de amortecimento e frequência natural dos polos associados ao i -ésimo modo de vibração de $G_v(s)$. Os parâmetros $\hat{\zeta}_i$ e $\hat{\omega}_i$ denotam os parâmetros associados aos zeros do mesmo modo de vibração.

2.2 Gerador Piezoelétrico

Por apresentar um efeito dual, o gerador piezoelétrico tem o comportamento inverso ao atuador, sendo gerido pelas mesmas equações anteriormente apresentadas [6]. Porém, neste caso, o gerador irá converter a deformação em um rearranjo de cargas internas que ao ser acoplado a um circuito gerará uma corrente.

O circuito equivalente do gerador piezoelétrico é representado na Figura 2, onde I_p é a corrente gerada, C_p a capacitância interna, R_p a resistência interna, R_d a resistência de perdas, sendo V_s a tensão gerada com circuito aberto e V_p a tensão na saída do elemento piezoelétrico. O gerador piezoelétrico é posicionado para que ocorra a maior deformação no mesmo, sendo próximo a extremidade engastada. A tensão elétrica V_s tem magnitude diretamente proporcional à deformação, tendo sua maior magnitude no primeiro modo de vibração, decaindo para os modos posteriores.

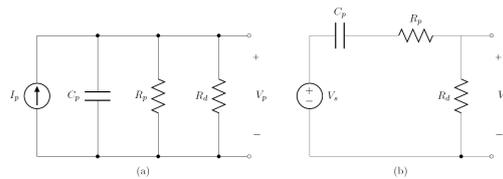


Figura 2: Circuito de Geração Piezoelétrico: (a) Fonte de Corrente; (b) Fonte de Tensão.

2.3 Cargas

O gerador piezoelétrico foi submetido a dois tipos distintos de cargas a fim de avaliar o seu comportamento: carga puramente resistiva, composta de um único resistor ligado a saída do elemento gerador, e a carga não linear, sendo um retificador de onda completa com resistência de carga e capacitor filtro. O modelo equivalente de cada uma das cargas é avaliado a seguir.

Para o caso de carga puramente resistiva foi aplicada a transformada de Laplace na equação das malhas do circuito com a carga resistiva conectada ao modelo de geração apresentado na Figura 2(b), onde a entrada é tensão $V_s(s)$ e saída a tensão na carga $V_o(s)$, obtendo-se:

$$G_l(s) = \frac{K_r s}{s + \tau}, K_r = \frac{R_d \cdot R_l \cdot C_p}{R_p \cdot R_l \cdot C_p + R_p \cdot R_d \cdot C_p + R_d \cdot R_l \cdot C_p}, \tau = \frac{R_l + R_d}{R_p \cdot R_l \cdot C_p + R_p \cdot R_d \cdot C_p + R_d \cdot R_l \cdot C_p} \quad (2)$$

onde R_l a carga resistiva. Percebe-se que a função de transferência tem o valor do zero em frequências tendendo a zero, devido ao efeito do capacitor C_p do modelo do gerador

piezoelétrico que está conectado em série com o circuito. O valor do polo se dá em função do valor da carga R_l , já que os outros termos da equação tem valores fixos.

A análise da carga não linear (Circuito retificador) baseia-se no fato da corrente gerada pelo elemento piezoelétrico ter característica aproximadamente senoidal [9]. A inclusão do retificador de onda completa caracteriza um comportamento não linear na saída do sistema. A fim de aproximar o circuito retificador por uma carga linear, considera-se que a influência das harmônicas de ordem elevada no sinal de tensão não tem contribuição significativa na potência final gerada. Neste caso, apenas a componente fundamental $V_{ef}(j\omega_o)$ é considerada de tal forma que a impedância da carga vista pelo elemento gerador é razão entre esta tensão e a corrente $I_p(j\omega_o)$ [7].

3 Identificação do Sistema

O sinal de excitação utilizado na identificação da função de transferência do sistema é uma Sequência Pseudoaleatória Binária (PRBS) variando entre $\pm 4V$ com período ajustável. A justificativa de utilização deste sinal é a semelhança com o ruído branco, sendo um sinal persistentemente excitante [1].

A geração do PRBS é realizada de forma digital, assim existe a presença do efeito da quantização, sendo necessária a utilização de um filtro passa-baixas definido como $G_{PB_p}(s)$. O amplificador é definido como k_{amp} . O filtro passa-baixa ativo é definido como $G_{PB_a}(s)$. O conjunto do gerador piezoelétrico e carga tem sua função de transferência descrita em (2), sendo atribuído um e um zero em função do capacitor interno do modelo do piezoelétrico. No condicionamento de sinal estão os dois filtros passa baixas, sendo um de primeira ordem e um de segunda ordem, adicionando três polos ao sistema.

Assim o sistema a ser identificado é representado na Figura 3 com equação definida em (3), onde o modelo utilizado para a viga é descrito em (1) considerando apenas os quatro primeiros modos de vibração, totalizando quatros pares de polos e zeros complexos conjugados.

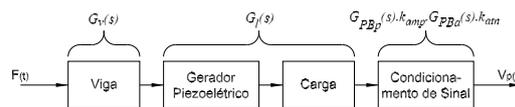


Figura 3: Representação do Sistema a ser Identificado

$$G(s) = G_{PB_p}(s)k_{amp}G_v(s)G_l(s)k_{atn}G_{PB_a}(s) \quad (3)$$

Na Figura 4(a) é apresentada a função de densidade espectral de potência do sinal de saída após o ensaio com o PRBS, na qual fica evidente as frequências naturais de vibração da viga da saída adquirida. Com auxílio da ferramenta *System Identification Toolbox*, do Matlab, a identificação do sistema foi realizada utilizando o método de Mínimos Quadrados Não linear. Na Figura 4(b) tem-se a comparação entre o diagrama de magnitude da resposta obtida no sistema teórico obtido a partir dos parâmetros da planta e da resposta obtida no procedimento de identificação.

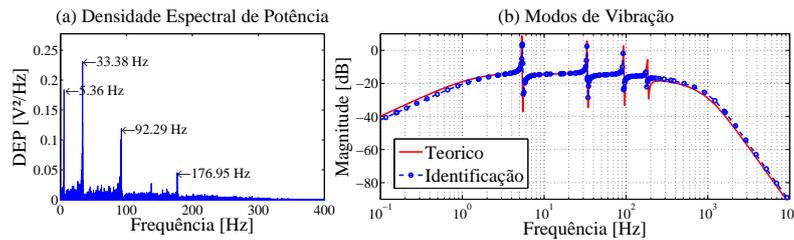


Figura 4: (a) Densidade Espectral de Potência com a Aplicação do PRBS e (b) Diagrama de Bode de Amplitude do Modelo Teórico e Identificado

Assim, os parâmetros relacionados aos modos de vibração da viga são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores para Função de Transferência $G_v(s)$.

| Modo | $\hat{\omega}_j [Hz]$ | $\omega_i [Hz]$ | $\hat{\zeta}_j$ | ζ_i |
|------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 1º | 5.58 | 5.42 | 0.0046 | 0.0045 |
| 2º | 34.10 | 33.38 | 0.004 | 0.004 |
| 3º | 93.62 | 92.25 | 0.0039 | 0.0040 |
| 4º | 179.18 | 177.89 | 0.0042 | 0.0039 |

4 Influência da Carga na Saída do Sistema

Uma observação importante é a alteração de potência de acordo com o tipo de carga e frequência de excitação do sistema. O gerador piezoelétrico, que apresenta características capacitivas em sua impedância interna, influencia diretamente na potência entregue a carga. Em baixas frequências a impedância interna da fonte tem valor elevado em função do capacitor C_p , sendo este valor caindo exponencialmente com a elevação da frequência. Os valores de potência instantânea para uma carga puramente resistiva em função dos modos de vibração são apresentados na Tabela 2. Nota-se que, mesmo com a tensão elétrica no gerador sendo proporcional à deformação, a maior potência entregue a carga puramente resistiva não é obtida no primeiro modo de vibração para os resistores menores que $200k\Omega$ por causa da impedância interna do gerador. Para os dois maiores resistores ($500k\Omega$ e $1M\Omega$) a potência máxima se dá no primeiro modo de vibração, diminuindo nos modos mais elevados, já que nestas cargas a resistência tem valor muito superior a impedância da fonte. Para o primeiro modo de vibração (frequência de $5.42Hz$) a maior potência se dá na resistência de $200k\Omega$, próxima a resistência ótima teórica de $229,35k\Omega$ para este modo. A potência máxima ocorre nas resistências de $50K\Omega$, $20k\Omega$ e $10k\Omega$ para o segundo, terceiro e quarto modo, respectivamente, comprovando a característica de diminuição da impedância da fonte com a elevação da frequência.

Para o caso da ligação da saída do micro gerador de energia no retificador, as impedâncias vista pelo gerador piezoelétrico são apresentadas na Tabela 3 em conjunto com a potência gerada. Percebe-se que a impedância diminui com a elevação da frequência

Tabela 2: Potência Instantânea Gerada [mW] com Carga Puramente Resistiva em Função dos Modos de Vibração Naturais da Viga

| Resistência [Ω] | 1º Modo | 2º Modo | 3º Modo | 4º Modo |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
| 1k | 0.126 | 2.772 | 1.266 | 16.94 |
| 5k | 0.611 | 1.223 | 4.757 | 45.95 |
| 10k | 1.108 | 23.04 | 70.68 | 47.49 |
| 20k | 2.257 | 38.68 | 69.08 | 33.72 |
| 50k | 4.677 | 41.78 | 35.97 | 13.83 |
| 100k | 9.571 | 24.95 | 16.97 | 6.491 |
| 200k | 9.997 | 13.41 | 8.507 | 3.238 |
| 500k | 7.914 | 5.043 | 3.229 | 1.281 |
| 1M | 3.194 | 2.753 | 1.636 | 0.661 |

para os mesmos valores de R_L e C_L , regidos pela resposta em frequência de um circuito RC paralelo. Outro item observado é que a potência gerada pelo elemento piezoelétrico não é linear. Isto se dá devido ao fato de em baixas frequências a tensão armazenada no capacitor C_L ser menor em função da descarga no resistor R_L . Com o aumento da frequência, um número maior de ciclos de tensão/corrente são retificados, elevando a tensão armazenada na carga. A Tabela 3 também apresenta os valores de tensão na carga em função da resistência e modos de vibração. Para a resistência de $1k\Omega$, a tensão no primeiro modo de vibração é quase zero, elevando a $5.82V$ no quarto modo. Esse comportamento é seguido para as resistências de $10k\Omega$ e $100k\Omega$. A resistência de $1M\Omega$ pode ser considerada como carga infinita (circuito aberto), tanto que a tensão retificada não sofre alteração significativa.

Tabela 3: Impedância Z_{ef} Vista Pelo Gerador Piezoelétrico [$k\Omega$], Potência Gerada P em Função da Frequência e Resistência [mW] e Tensão Contínua na Carga [V](Capacitor $C_L = 10\mu F$)

| Resistência [Ω] | 1º Modo | | | 2º Modo | | | 3º Modo | | | 4º Modo | | |
|--------------------------|----------|-------|-----------|----------|-------|-----------|----------|-------|-----------|----------|-------|-----------|
| | Z_{ef} | P | V_{ref} |
| 1k | 1.808 | 0.256 | 0.21 | 1.707 | 0.227 | 1.18 | 1.623 | 0.218 | 3.15 | 1.528 | 0.206 | 5.82 |
| 10k | 9.328 | 1.207 | 1.87 | 7.817 | 1.02 | 10.13 | 5.953 | 0.755 | 22.27 | 4.420 | 0.526 | 33.11 |
| 100k | 63.25 | 8.194 | 14.66 | 27.31 | 3.03 | 39.46 | 12.24 | 1.195 | 39.76 | 6.725 | 0.620 | 39.82 |
| 1M | 98.56 | 12.37 | 38.32 | 36.07 | 3.28 | 39.67 | 13.35 | 1.189 | 39.87 | 6.950 | 0.616 | 39.88 |

5 Conclusões

Neste artigo, é feita a avaliação de um sistema de micro geração de energia baseado no efeito piezoelétrico submetido a diferentes tipos de cargas. Dois tipos de cargas (resistiva e não linear) foram investigados, sendo analisada a sua influência nas características do sistema e na potência gerada.

A carga puramente resistiva evidencia o comportamento de geração onde existe um ponto ótimo entre a frequência de excitação e a carga utilizada, bem como a influência da carga no modo de vibração do sistema. O comportamento do sistema com a inclusão

do retificador de onda completa muda de forma expressiva, iniciando pela da tensão que é gerada na saída do elemento piezoelétrico, que tem característica diferente da excitação. A impedância vista pela carga varia com o modo de vibração, para resistência de $1k\Omega$ a impedância cai aproximadamente 5% a cada modo, para $10k\Omega$ cai 25%, para $100k\Omega$ em média 112% e para $1M\Omega$ em média 145%. A potência gerada é reduzida com a elevação dos modos de vibração, sendo que para resistência de $1M\Omega$ a potência diminui 4x do 1º para o 2º modo de vibração, para resistência de $10k\Omega$ a queda é de 15%. Esta ocorrência está ligada ao fato que no 1º modo de vibração ocorre a maior deformação na viga.

Agradecimentos

Agradecemos a CAPES pela concessão de apoio financeiro para o Mestrando Marcos Antonio Jeremias Coelho e a FAPERGS pelo apoio à pesquisa PqG 2110-2551/13-0.

Referências

- [1] L. A. Aguirre, Introdução à Identificação de Sistemas - Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais, Editora UFMG, 4ª Edição, (2015).
- [2] S.W. Arms, C.P. Townsend, D.L. Churchill, J.H. Galbreath e S.W. Mundell, Power management for energy harvesting wireless sensors, SPIE International Symposium on Smart Structures and Smart Materials, vol. 1, 1-9, (2005).
- [3] S. P. Beeby, M. J. Tudor e N. M. White, Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, Measurement Science and Technology, vol. 17, R175-R195, (2006), DOI: 10.1088/0957-0233/17/12/R017.
- [4] D. Henrion, C. Prieur e S. Tliba, Improving conditioning of polynomial pole placement problems with application to low-order controller design for a flexible beam, LAAS-CNRS Research Report, vol. 1, 04163, (2004).
- [5] J. Hu, J. Jong e C. Zhao, Vibration energy harvesting based on integrated piezoelectric components operating in different modes. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 57, 386-394, (2010), DOI: 10.1109/TUFFC.2010.1418.
- [6] IEEE, IEEE standard on piezoelectricity, ANSI/IEEE Std 176-1987, 1-66, (1988).
- [7] J. Liang e W. Liao, Impedance modeling and analysis for piezoelectric energy harvesting systems. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 17, 1145-1157, (2012), DOI: 10.1109/TMECH.2011.2160275.
- [8] S.O. Reza Moheimani e A. J. Fleming, Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping, Springer London, 1ª Edição, (2006).
- [9] S. Priya e D. J. Inman, Energy Harvesting Technologies, Springer, (2009).