

COLHEITA DE ENERGIA VIBRACIONAL INDUZIDA POR ESCOAMENTO INTERNO A PARTIR DE MATERIAIS INTELIGENTES

Pedro Caetano Cardoso, pedrocaetano@poli.ufrj.br¹

Virgílio Junior Caetano, vj.caetano@mecanica.coppe.ufrj.br¹

Marcelo Amorim Savi, savi@mecanica.ufrj.br¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE – Engenharia Mecânica, Centro de Mecânica Não-Linear, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo: A vibração mecânica é uma das energias mais abundantes disponíveis no ambiente, consistindo em uma interessante fonte de energia residual que pode ser explorada por sistemas de colheita de energia para alimentar sensores sem fio e dispositivos de baixa potência. Os materiais inteligentes constituem uma alternativa para promover a conversão mecânica-elétrica. A colheita de energia piezoelétrica têm recebido bastante atenção na literatura, tendo alcançado um grau de maturidade técnica e, em alguns casos, custo-benefício, que justifica seu amplo uso em diversas aplicações. Os coletores de energia magnetostritivos, por outro lado, receberam pouca atenção e podem fornecer maior densidade de potência e menor impedância de saída. Este trabalho investiga sistemas de colheita de energia visando extrair energia da vibração lateral de dutos com escoamento interno de fluido. O dispositivo é composto por um material inteligente (magnetostritivo ou piezoelétrico) ligado a uma estrutura de viga em balanço e acoplado a um circuito elétrico. A teoria de viga de Euler-Bernoulli e o método de Galerkin são empregados, respectivamente, para modelar e discretizar ambos os sistemas, o duto e o dispositivo de captação de energia. As equações diferenciais de movimento são integradas empregando o método Runge-Kutta de quarta ordem. Simulações numéricas são realizadas para estabelecer o desempenho do sistema e a influência da potência de saída gerada devido às variações de velocidade do escoamento interno, bem como a comparação entre os diferentes materiais inteligentes.

Palavras-chave: Colheita de energia, material magnetostritivo, escoamento interno, interação fluido-estrutura.

1. INTRODUÇÃO

Coletores de energia baseados em vibrações são vantajosos em certas aplicações, principalmente na integridade estrutural; aplicações aeroespaciais; operações em oceano profundo; e plantas de reatores nucleares. Dentre os princípios de conversão de energia de vibração em eletricidade, os que estão em destaque na literatura são os eletromagnéticos, piezoelétricos e eletroestáticos. Mais recentemente, os materiais magnetostritivos vêm sendo estudados como uma forma de geração de energia com alta densidade e com alto ciclo de vida. De maneira geral, os dispositivos de colheita de energia podem ser representados como a Fig. 1, onde uma energia de entrada é fornecida ao sistema e, para cada material inteligente, há uma forma de conversão dessa energia mecânica em energia elétrica.

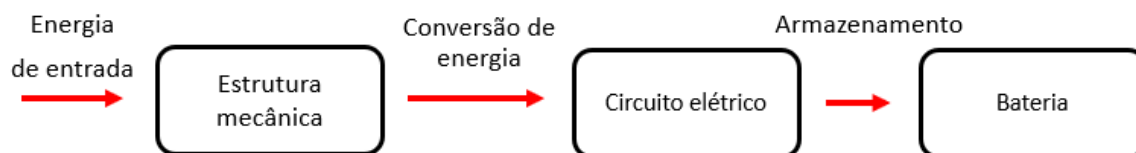


Figura 1. Esquema geral de um dispositivo de colheita de energia.

Hannan *et al* (2014) revisaram os dispositivos já desenvolvidos para aplicação na área biomédica, destacando a energia gerada e os possíveis desafios baseados no material e aplicação de cada autor. Dhakar (2017) apresentou uma visão geral de tecnologias em colheita de energia, destacando os diversos tipos de materiais usados. Dentre os tipos de materiais, Narita e Fox (2018) compararam dispositivos desenvolvidos por mais de 20 autores, destacando materiais piezoelétricos, magnetostritivos e magnetoelétricos em sua composição. O estudo mostrou que a tensão elétrica, corrente e potência são altamente dependentes da seleção dos materiais e das estruturas. Um exemplo dessa diversidade de dispositivos é a geração de até 5.8 mW através de um dispositivo usando material piezoelétrico (Kuang e Zhu, 2016), enquanto usando

um material magnetostritivo (Terfenol-D) com estrutura de dimensões maiores, pode-se gerar até 4 W (Fang e Whang, 2017).

Este trabalho tem como objetivo investigar a colheita de energia a partir da vibração induzida pelo escoamento interno em uma coluna flexível. Essa aplicação pode estar associada a uma coluna de extração de petróleo em condições de operação ou outros vários campos da indústria, tubulação de combustível de aviação e sistemas de resfriamento de usinas nucleares. A vibração induzida pelo escoamento do fluido pode proporcionar grandes amplitudes de vibração que podem ser exploradas para fornecer energia para um dispositivo de colheita de energia. Após esta introdução é apresentado, no capítulo 2, uma revisão de literatura sobre de colheita de energia a partir de materiais inteligentes. No capítulo 3, apresenta-se uma formulação matemática para estimar a vibração da tubulação induzida por escoamento interno, analisando a interação fluido-estrutura de forma desacoplada. Depois disso, discute-se um modelo matemático para um dispositivo de colheita de energia considerando diferentes materiais inteligentes para promover a conversão mecânica-elétrica. Notadamente, consideram-se os materiais piezoelétricos (PZT) e os magnetostritivos (Terfenol-D e Galfenol). O capítulo 4 é destinado a apresentação dos resultados das simulações numéricas comparando o desempenho dos dispositivos. Por fim, as conclusões e as considerações finais são apresentadas no capítulo 5.

2. COLHEITA DE ENERGIA A PARTIR DE MATERIAIS INTELIGENTES

Dispositivos de colheita de energia baseada em vibração é um tema de grande relevância atual, sendo de especial interesse aqueles que promovem a conversão de energia mecânica-elétrica a partir de materiais inteligentes. O uso de material piezoelétrico tem recebido grande atenção devido às diversas aplicações (Taware e Deshmukh, 2013). Essas aplicações estão relacionadas a estruturas de sistema de monitoramento de saúde e dispositivos inteligentes de rede sem fio (Li *et al*, 2014; Sodano *et al*, 2004). Os dispositivos de colheita de energia apresentados na literatura são usualmente representados por um oscilador mecânico acoplado a um circuito elétrico através de um elemento piezoelétrico. Experimentalmente, é usual construir uma viga em balanço onde se cola um elemento piezoelétrico o que é de fácil fabricação e alta tensão de flexão (Avvari *et al*, 2017).

Zhao *et al* (2018) propuseram um dispositivo baseado em uma viga em balanço para colheita de energia considerando baixas frequências de excitação. Através de experimentos e análise em elementos finitos, evidenciaram que o modelo teórico proposto está de acordo com os experimentos. Lee e Wu (2007) apresentaram um modelo em escala reduzida para ser aplicado em circuitos elétricos de pequenas dimensões onde se necessita baixa energia. A adição de uma massa na extremidade livre da viga foi explorada por Kok *et al* (2008) através de simulações numéricas e experimentos. Usando duas camadas de material piezoelétrico, Jeong *et al* (2008) propuseram um dispositivo que possui frequências naturais diferentes para possibilitar a otimização da energia gerada.

Os materiais magnetostritivos também tem despertado interesse devido as suas propriedades. Um dispositivo de colheita de energia a partir de materiais magnetostritivos está usualmente associado com outro material, um substrato, o que também pode ser feito para dispositivos baseados em materiais piezoelétricos. Essa liga pode ser um polímero, o que lhe confere maior flexibilidade em operações (Ashik e Sharma, 2015). Esses tipos de dispositivos podem ser divididos em dois grupos: axial e flexional. A Fig. 2 mostra dois desenhos esquemáticos desses dispositivos onde se observa que ambos necessitam da utilização de bobinas atreladas ao circuito elétrico com uma resistência. Apesar de ambos os casos trabalharem em deformação de tração e compressão, eles diferem na origem da sollicitação. Enquanto o tipo axial possui um forçamento na direção da deformação, no modelo flexional a sollicitação se encontra na direção perpendicular da deformação.

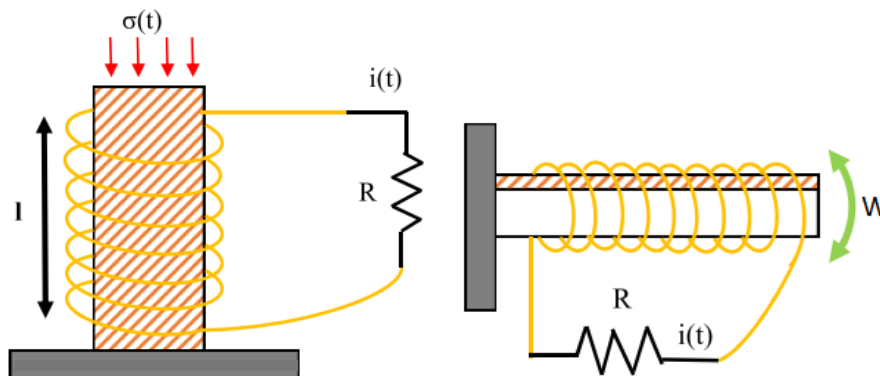


Figura 2. Esquema de modelos básicos para dispositivos de colheita de energia com material magnetostritivo.

Um modelo típico de aplicação de material magnetostritivo a colheita de energia é apresentada por Berbyuk (2013) que utiliza um cilindro de Galfenol de 6.35 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento, sendo circundado por 4000 voltas de bobina e recebendo uma tensão axial harmônica de 55 MPa a uma frequência de 50 Hz. Nesse trabalho, utilizam-se ímãs ao redor do dispositivo para aumentar a tensão elétrica no circuito visando uma maior potência de saída. Com essa

adição, a potência gerada chega a 0.45 W. Deng (2015) utilizou um dispositivo semelhante, porém com o material Terfenol-D. Através de um dispositivo de 6 mm de diâmetro e comprimento de 10 mm, aplicou-se uma tensão axial de 7.3 MPa com frequência de 750 Hz.

Uma configuração do tipo axial foi proposta por Staley e Flatau (2005) que se utiliza um dispositivo de flexão com vibração de base para comprimir o material magnetostritivo perto da base. Essa modificação visa aproveitar o momento gerado pela vibração da viga em balanço para amplificar a tensão de compressão aplicada no material.

Comercialmente, os modelos do tipo axial tiveram sua primeira configuração apresentada por Murphree (2014) e Nair e Nachlas (2014), onde se aproveita a vibração marítima para tracionar e comprimir o dispositivo de colheita de energia.

A desvantagem das configurações apresentadas anteriormente é a necessidade de ser instalada na direção da aplicação da força externa e a restrição do desempenho do dispositivo com relação à janela de frequência da força externa aplicada. Em contrapartida, os dispositivos baseados em configuração do tipo flexional são ideias para colheita de energia em qualquer superfície vibracional, podendo-se utilizar uma viga com uma camada de material magnetostritivo, duas camadas (bimorfo) ou então uma viga uniforme com material substrato e material magnetostritivo.

Ueno e Yamada (2011) propuseram um modelo de viga bimorfa de Galfenol com utilização de força de impacto, sendo gerados 10 impactos a cada segundo. Com uma viga de dimensões 1 mm × 0.5 mm × 10 mm, e 312 voltas de bobinas, consegue-se atingir uma potência de saída de 3.5 mW. Posteriormente, Kita e Ueno (2015) otimizaram o modelo desenvolvido anteriormente com a introdução de uma abertura no meio da viga para introduzir a camada de Galfenol em uma região onde se trabalha puramente em compressão ou tensão. Essa modificação em uma viga de dimensões 7 mm × 1.5 mm × 50 mm leva a uma potência de saída máxima de 0.73 W.

3. MODELO MATEMÁTICO

Esta seção apresenta os modelos matemáticos utilizados para descrever a colheita de energia a partir de escoamento interno de tubulações. Inicialmente, discute-se a vibração lateral de uma tubulação induzida por escoamento interno. Na sequência, apresenta-se o modelo do dispositivo de colheita de energia a partir de materiais inteligentes, utilizando tanto materiais piezoelétricos quanto magnetostrictivos.

3.1. Vibração lateral de tubulação induzida por escoamento interno

As equações dinâmicas de um tubo com transporte de fluido podem ser encontradas através do método de Newton ou princípio generalizado de Hamilton conforme discutido nas referências (Kheiri e Païdoussis, 2014; McIver, 1973). Outros modelos dinâmicos foram desenvolvidos e atualmente há um consenso para um modelo clássico de dinâmica de dutos, levando em conta um modelo linear de vibração livre que foi apresentado por Païdoussis e Li (1993). Diversos estudos foram conduzidos para investigar a relação entre a vibração lateral e o escoamento interno do fluido. Li e Wang (2018) concluíram, através de um estudo com variação da velocidade de escoamento interno, em que esta leva ao aumento do deslocamento lateral.

A vibração da tubulação foi utilizada como motivação para colheita de energia com material piezoelétrico por Franzini e Brunzel (2018), utilizando um modelo reduzido de dois graus de liberdade. Posteriormente, Orsino e Pesce (2010) continuaram essa linha de pesquisa investigando um modelo plano não-linear de ordem reduzida.

Considere uma tubulação mostrada na Fig. 3, onde l é o comprimento, m a massa da tubulação e w_b o deslocamento lateral. Nessa tubulação escoam um fluido de massa m_f e velocidade de escoamento interno U . Considerando a tubulação como uma viga esbelta, onde a dimensão do comprimento é muito maior que a largura, adota-se a teoria de viga de Bernoulli-Euler.

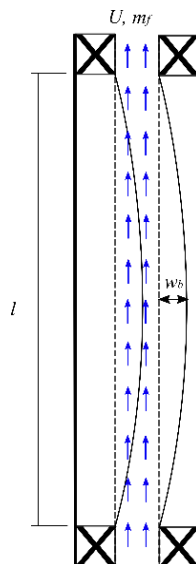


Figura 3. Esquema de tubulação com escoamento interno gerando deslocamento lateral.

Considerando a geometria descrita anteriormente, é considerado o modelo que é tido como o mais simples para descrever a interação fluido-estrutura da vibração induzida por escoamento interno (Païdoussis, 1998), sendo bastante utilizado. A suposição básica é que o fluxo de fluido pode ser aproximado como um fluxo de pistão, como se fosse uma haste infinitamente flexível viajando através do tubo, todos os pontos do fluido tendo uma velocidade U em relação ao tubo. Essa é uma aproximação razoável para um perfil de fluxo totalmente desenvolvido.

Baseado no modelo discutido, é realizada a adimensionalização baseado pelas unidades de comprimento, massa e constantes do material. Após essa etapa, o método de Galerkin é aplicado assumindo uma separação de variáveis, em função do tempo (q_r) e do espaço (ϕ_r). Desta forma, desprezando-se o termo de pressão e a força externa, escreve-se a seguinte equação:

$$\delta_{ij}\ddot{q}_{r,j} + \left(G_{ij} + 2\beta\frac{1}{2}uB_{t,ij}\right)\dot{q}_{r,j} + \{\Lambda_{ij} + \gamma B_{t,ij} + [u^2 - \gamma]C_{t,ij} + \gamma D_{t,ij}\}q_{r,j} = 0 \quad (1)$$

onde δ_{ij} é o delta de Kronecker, u é a velocidade do escoamento adimensional, γ é a relação de massa e rigidez adimensional e β é a relação de massa da estrutura e massa de fluido confinado. As componentes Λ_{ij} e G_{ij} apresentam valores nulos, exceto quando os índices iguais com elementos iguais à λ_r^4 e $(\alpha\lambda_r^4 + \zeta)$, respectivamente. Os componentes de $B_{t,ij}$, $C_{t,ij}$ e $D_{t,ij}$ são compostas por elementos calculados através das seguintes relações.

$$B_{t,ij} = \int_0^1 \phi_i \phi_j' d\zeta; \quad C_{t,ij} = \int_0^1 \phi_i \phi_j'' d\zeta; \quad D_{t,ij} = \int_0^1 \phi_i \zeta \phi_j'' d\zeta \quad (2)$$

Esse sistema pode ser resolvido através do método de Runge-Kutta de quarta ordem, cuja implementação se deu no MATLAB. Considerando o deslocamento da viga no ponto médio de seu comprimento e com valores dimensionais extraídos de relatórios técnicos industriais, pode-se observar o resultado do deslocamento lateral e o espaço de fase para uma velocidade de 30 m/s na Fig. 4. A partir dessas simulações pode-se avaliar a aceleração que será utilizada para o modelo de colheita de energia.

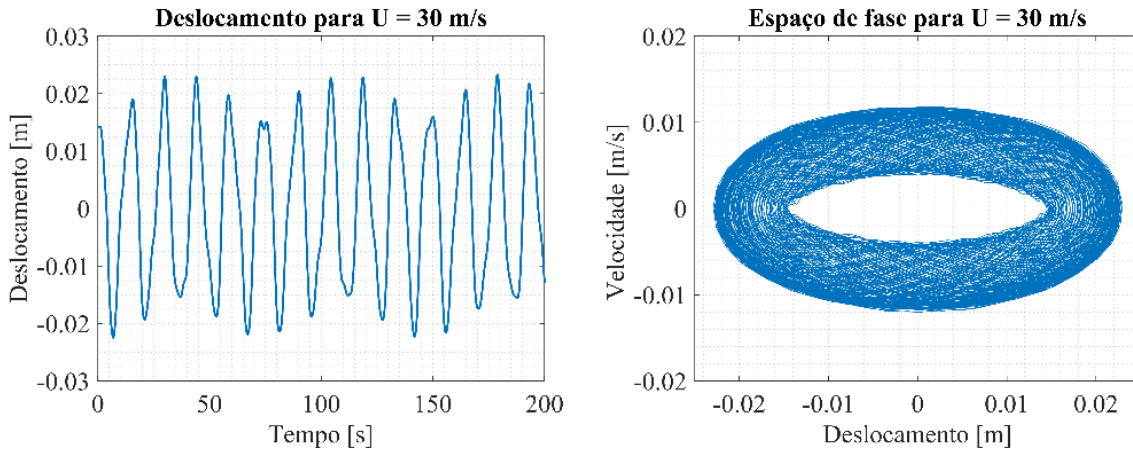


Figura 4. Variação temporal do deslocamento considerando uma velocidade de escoamento de 30 m/s (esquerda) e o espaço de fase para essa mesma velocidade (direita).

3.2. Modelo de colheita de energia

Considere um sistema de colheita de energia baseado em estrutura mista de material substrato (aço ou alumínio) e material inteligente (magnetostritivo ou piezoelétrico). Essa estrutura é modelada como uma viga composta segundo a teoria de Bernoulli-Euler onde consideram-se pequenas deformações. A seguir, consideram-se os modelos considerando os diferentes materiais inteligentes, magnetostritivo e piezoelétrico, conforme mostrado na Figura 5.

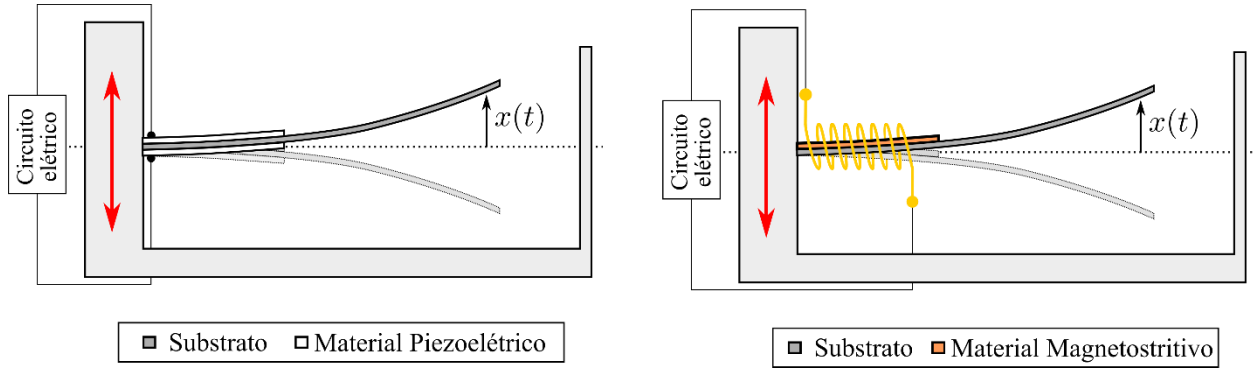


Figura 5. Esquemático dos dispositivos de colheita de energia utilizando materiais inteligentes magnetostritivo e piezoelétrico.

3.2.1. Material magnetostritivo

Para os materiais magnetostritivos, a lei de Ampere relaciona a intensidade do campo magnético com a corrente, o número de voltas de uma bobina e o comprimento da bobina. Com isso, a equação de movimento para materiais magnetostritivos fica da seguinte maneira:

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} - \Theta i(t) \left[\frac{\partial \delta(x - x_1)}{\partial x} - \frac{\partial \delta(x - x_2)}{\partial x} \right] = -m \frac{\partial^2 w_b(t)}{\partial t^2} \quad (3)$$

onde E é o módulo de Young, I é momento de inércia de área, w é a deflexão da viga, m é a massa do conjunto substrato e material magnetostritivo, c é a constante de amortecimento, Θ é constante de acoplamento magnetomecânico e w_b é definido como a deslocamento de base proveniente do resultado numérico da Eq. (2).

Além da parte mecânica, é necessário realizar o estudo das equações de governo para o circuito elétrico que é alimentado pela bobina presente na estrutura. Qualquer variação no campo magnético no interior de uma bobina de fio com N voltas gera uma voltagem (força eletromotriz) induzida na bobina. Considerando a deformação segundo o modelo de Bernoulli-Euler, as relações constitutivas do material, e resolvendo as integrais, pode-se chegar à equação elétrica completa.

$$Ri(t) = \Theta \int_0^l \frac{d^3 w(x, t)}{dt dx^2} dx - L \frac{di(t)}{dt} \quad (4)$$

onde R é a resistência do circuito atrelado, i é a corrente induzida e L a indutância.

3.2.2. Material piezoelétrico

Considerando agora um material piezoelétrico, e escrevendo convenientemente, a componente $\mathbb{E}_3$ do campo elétrico como função da tensão elétrica de saída para cada camada de material piezoelétrico, $\mathbb{E}_3 = -v(t)/2h_p$, a equação de movimento, usando o momento fletor para a viga bimorfa combinado com as equações de deflexão e força cortante, pode ser escrita da seguinte forma:

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} - \vartheta v(t) \left[\frac{\partial \delta(x - x_1)}{\partial x} - \frac{\partial \delta(x - x_2)}{\partial x} \right] = -m \frac{\partial^2 w_b(t)}{\partial t^2} \quad (5)$$

onde ϑ é a constante de acoplamento eletromecânica.

Uma forma de obter a equação elétrica é representar o material piezoelétrico como uma fonte de corrente em paralelo com sua capacitância interna. Desta forma, aplicando a lei de Kirchhoff no circuito elétrico:

$$C_p \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R} - i(t) = 0 \quad (6)$$

onde C_p é Capacitância interna equivalente e v é a tensão elétrica.

4. RESULTADOS

Simulações numéricas são realizadas considerando os parâmetros apresentados na Tabela 1 e utilizados para representar o dispositivo de colheita de energia associado aos materiais inteligentes.

Tabela 1. Valores das constantes dos materiais inteligentes.

Propriedades	Galfenol	Terfenol	PZT-5A
h_s (m)	0.005	0.005	0.005
h_m (m)	0.001	0.001	0.001
E_s (GPa)	190	190	190
E_m (GPa)	50	35	60.9
b (m)	0.012	0.012	0.012
d (nm/A)	8.5	7.0	171
l (m)	0.185	0.185	0.185
ρ_s (kg/m ³)	7850	7850	7850
ρ_m (kg/m ³)	7800	9250	7864
N	3000	3000	-

As excitações são provenientes do escoamento do fluido em uma tubulação e a resistência elétrica do sistema de colheita é um parâmetro a ser determinado, tendo influência direta na geração de energia em pontos distintos dependendo da estrutura e do material. Considere, portanto, um forçamento da seguinte forma:

$$F_j(t) = -\ddot{w}_b \int_0^L \phi_j dx \quad (7)$$

A potência do sistema pode ser avaliada a partir da raiz do valor quadrático médio (RMS), como segue:

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{(T_2 - T_1)} \int_{T_1}^{T_2} P(t)^2 dt} \quad (8)$$

Neste momento, inicia-se a análise de um dispositivo de colheita de energia com Galfenol, excitado a partir do deslocamento lateral de um duto com escoamento interno. A Fig. 6 apresenta o deslocamento e a corrente associados ao dispositivo de colheita de energia, mostrando uma resposta periódica em regime permanente. Observa-se a mudança entre os regimes transiente e permanente, em que próximo aos 0.05 segundos, o sistema atinge o regime permanente.

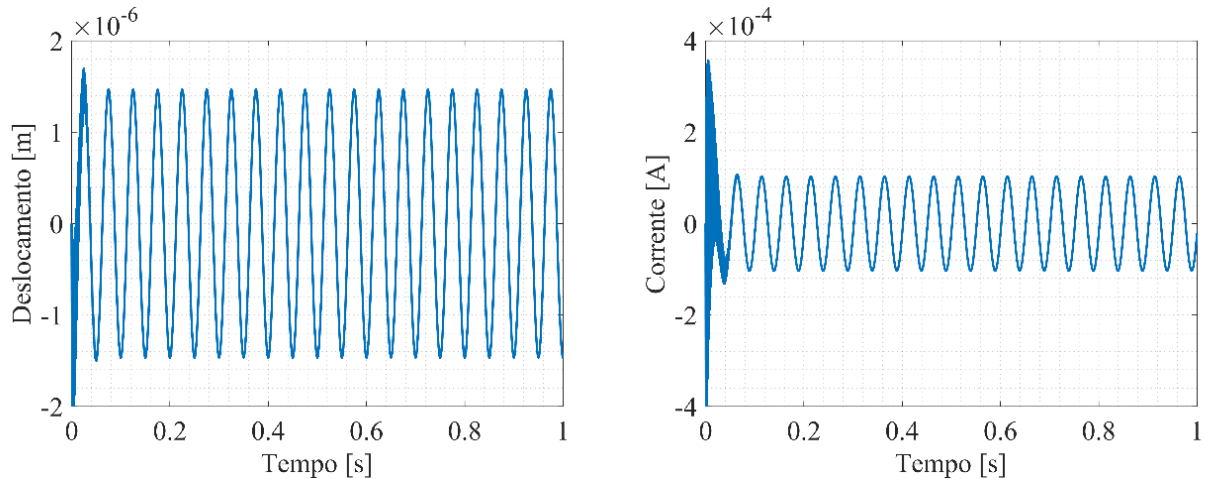


Figura 6. Resultado numérico da simulação. A esquerda está o deslocamento da extremidade livre da estrutura e a direita a corrente induzida no sistema elétrico

Variando a resistência do circuito elétrico de geração de energia, pode-se encontrar uma faixa em que a potência gerada é maior. A Fig. 7 ilustra o resultado dos valores de potência gerada para diferentes valores da resistência. A potência é uma função dependente da corrente e da resistência e seu máximo se encontra perto de 50 Ω . Por se tratar de um sistema linear, a frequência de ressonância encontra-se no valor da frequência natural do sistema. A adição de massa concentrada na extremidade da viga é uma opção para transladar esse pico de acordo com as necessidades de geração de energia.

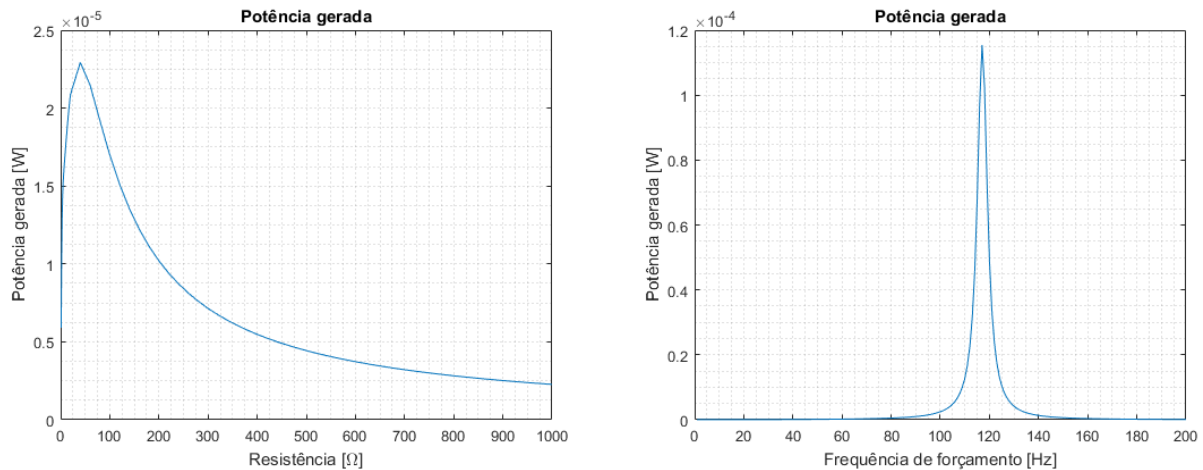


Figura 7. A esquerda está a potência variando a resistência do sistema e a direita a potência variando a frequência de forçamento.

A Fig. 8 mostra a relação entre as potências de saída gerada para a mesma frequência de forçamento, amplitude de forçamento e propriedades espaciais considerando os diferentes materiais inteligentes para a conversão mecânica-elétrica. Para cada material, a zona de maior valor de potência é distinta, estando a mais de uma ordem de grandeza distante das outras. Nota-se também que os materiais magnetostritivos possuem uma alta dependência em relação à bobina, que é uma variável que influencia diretamente no valor da indutância (L), o que pode alterar completamente a análise de comparação entre os materiais.

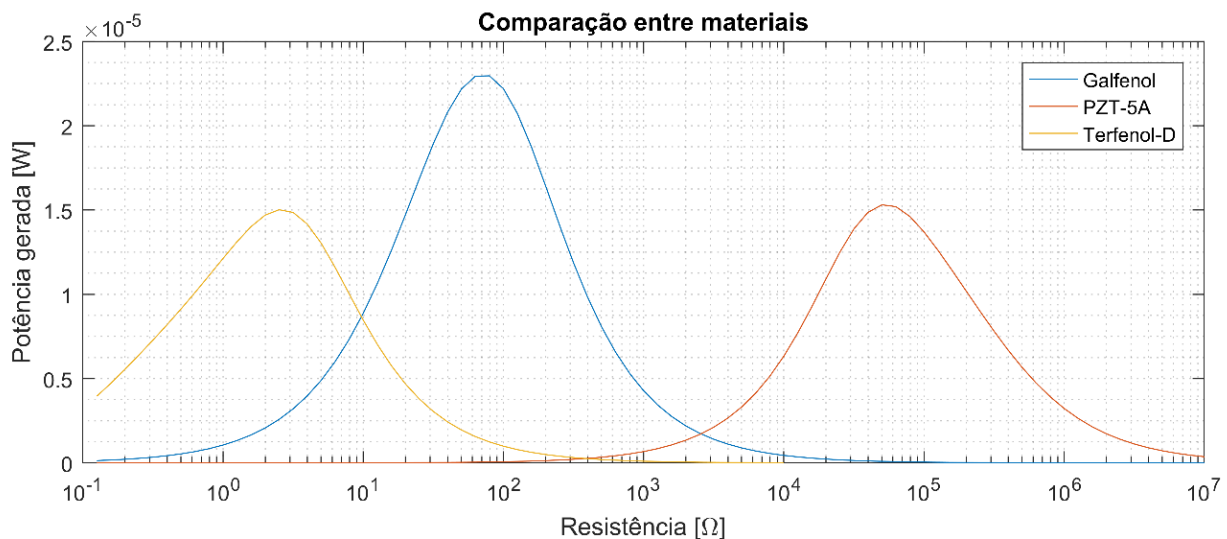


Figura 8. Comparação entre os materiais inteligentes com variação da resistência do circuito elétrico: Galfenol, Terfenol-D e PZT-5A.

Considerando uma resistência de 100Ω , pode-se fazer a comparação entre as frequências de excitação de base utilizando os diferentes materiais. A Fig. 9 mostra a diferença das potências geradas a partir dos diferentes materiais inteligentes. Como a camada de material inteligente é cinco vezes menor em relação ao substrato, isso faz com que o pico de ressonância da resposta se encontra em faixas de frequências próximas. Observa-se que a potência gerada pelo dispositivo de colheita de energia baseado em material Galfenol apresenta valores maiores comparados aos outros materiais inteligentes, o que o torna ideal para o uso nessas condições apresentadas.

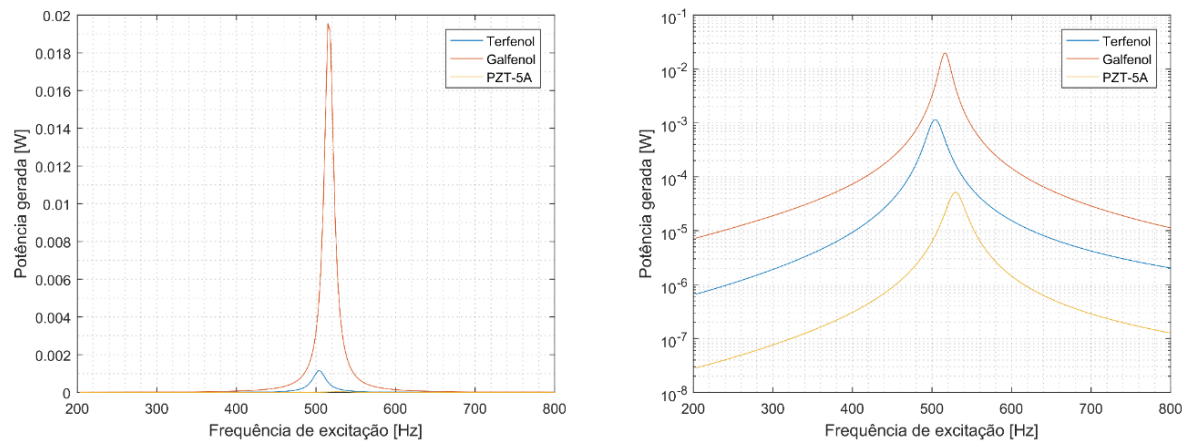


Figura 9. Comparação entre os materiais inteligentes com variação frequência de excitação: Galfenol, Terfenol-D e PZT-5A.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho investiga a colheita de energia em tubulações, induzidas por escoamento interno. Inicialmente é feito uma análise da dinâmica de um duto engastado nas extremidades induzido por escoamento interno. A variação da velocidade do escoamento interno produz uma variação da frequência natural da estrutura. As hipóteses utilizadas no duto não consideram complexidades geométricas ou reentrada de fluido, o que propicia para um aumento da amplitude e frequência de vibração. A amplitude de vibração lateral foi convertida em aceleração de base para ser utilizada como força de excitação do dispositivo de colheita de energia. A análise linear dos dispositivos de colheita de energia utilizando materiais inteligentes é feita através de uma varredura da resistência do circuito elétrico atrelado a viga em balanço. Observa-se que a potência ótima gerada depende da resistência escolhida, e o valor desse pode variar de ordens de grandezas para cada material inteligente considerado. Considerando a resistência ótima para cada caso, é observado que o Galfenol gera uma maior potência de saída para as mesmas condições operacionais que os demais, como mesma amplitude de forçamento e frequência de ressonância.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio das Agências Brasileiras de Pesquisa CNPq, CAPES e FAPERJ.

7. REFERÊNCIAS

- ASHIK, K.P., SHARMA, R.S. "A Review on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, v. 03, n. 05, pp. 420–426, 2015.
- AVVARI, P.V., YANG, Y., et al. "Long-Term Fatigue Behavior of a Cantilever Piezoelectric Energy Harvester", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 28, n. 9, pp. 1188–1210, 2017.
- BERBYUK, V. "Vibration Energy Harvesting Using Galfenol-Based Transducer", v. 8688, pp. 86881F, 2013.
- DENG, Z. "Nonlinear Modeling and Characterization of the Villari Effect and Model-Guided Development of Magnetostrictive Energy Harvesters and Dampers", 2015.
- DHAKAR, L. "Triboelectric Devices for Power Generation and Self-Powered Sensing Applications", 2017.
- FANG, Z.W., ZHANG, Y.W., et al. "Integration of a Nonlinear Energy Sink and a Giant Magnetostrictive Energy Harvester", *Journal of Sound and Vibration*, v. 391, pp. 35–49, 2017.
- FRANZINI, G.R., BUNZEL, L.O. "A Numerical Investigation on Piezoelectric Energy Harvesting from Vortex-Induced Vibrations with One and Two Degrees of Freedom", *Journal of Fluids and Structures*, v. 77, pp. 196–212, 2018.
- HANNAN, M.A., MUTASHAR, S., et al. "Energy Harvesting for the Implantable Biomedical Devices: Issues and Challenges", *BioMedical Engineering OnLine*, v. 13, n. 1, pp. 79, 2014.
- JEONG, S., KIM, M., et al. "Sensors and Actuators A : Physical Two-Layered Piezoelectric Bender Device for Micro-Power Generator", *Sensors and Actuators*, v. 148, pp. 158–167, 2008.
- KHEIRI, M., PAÏDOUSSIS, M.P. "On the Use of Generalized Hamilton's Principle for the Derivation of the Equation of Motion of a Pipe Conveying Fluid", *Journal of Fluids and Structures*, v. 50, pp. 18–24, 2014.
- KITA, S., UENO, T., et al. "Improvement of Force Factor of Magnetostrictive Vibration Power Generator for High Efficiency", *Journal of Applied Physics*, v. 117, n. 17, 2015.
- KOK, S.L., WHITE, N.M., et al. "A Free-Standing , Thick-Film Piezoelectric Energy Harvester", *IEEE SENSORS 2008*, n. c, 2008.

- KUANG, Y., ZHU, M. "Characterisation of a Knee-Joint Energy Harvester Powering a Wireless Communication Sensing Node", Smart Materials and Structures, v. 25, n. 5, pp. 0, 2016.
- LEE, B.S., WU, W.J. "Power Harvesting Using Piezoelectric MEMS Generator with Interdigital Electrodes", IEEE Ultrasonics Symposium, n. 1, pp. 1598–1601, 2007.
- LI, B., WANG, Z., et al. "Dynamic Response of Pipe Conveying Fluid with Lateral Moving Supports", Shock and Vibration, v. 2018, 2018.
- LI, H., TIAN, C., et al. "Energy Harvesting from Low Frequency Applications Using Piezoelectric Materials", Applied physics reviews, v. 1, 2014.
- MCIVER, D.B. "Hamilton's Principle for Systems of Changing Mass", Journal of Engineering Mathematics, v. 7, n. 3, pp. 249–261, 1973.
- MURPHREE, Z. Magnetostrictive Wave Energy Harvester with Heave Plate., World Intellectual Property Organization, 2014.
- NAIR, B., NACHLAS, J.A., ET AL. Magnetostrictive Devices and Systems., United States Patent Application Publication, 2014.
- NARITA, F., FOX, M. "A Review on Piezoelectric, Magnetostrictive, and Magnetoelectric Materials and Device Technologies for Energy Harvesting Applications", Advanced Engineering Materials, v. 20, n. 5, pp. 1–22, 2018.
- ORSINO, R.M.M., PESCE, C.P., et al. "Cantilevered Pipe Ejecting Fluid under VIV: An Investigation Based on a Planar Nonlinear Reduced - Order Model", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018.
- PAÏDOUSSIS, M.P. Fluid-Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow. 1 ed. Montreal: academic press, 1998.
- PAÏDOUSSIS, M.P. & LI, G.X. (1993). Pipes conveying fluid: A model dynamical problem. Journal of Fluids and Structures, 7(2) , 137–204.
- SODANO, H.A., INMAN, D.J., et al. "Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting", Strain Journal, v. 40, n. 2, pp. 49–58, 2004.
- STALEY, M.E., FLATAU, A.B. "Characterization of Energy Harvesting Potential of Terfenol-D and Galfenol", Smart Structures and Materials, n. May 2005, pp. 630, 2005.
- TAWARE, S.M., DESHMUKH, S.P. "A Review of Energy Harvesting From Piezoelectric Materials", IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, pp. 43–50,
- UENO, T., YAMADA, S. "Performance of Energy Harvester Using Iron-Gallium Alloy in Free Vibration", IEEE Transactions on Magnetics, v. 47, n. 10, pp. 2407–2409, 2011.
- ZHAO, Q., LIU, Y., et al. "Design Method for Piezoelectric Cantilever Beam Structure under Low Frequency Condition", International Journal of Pavement Research and Technology, v. 11, n. 2, pp. 153–159, 2018.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MAGNETOSTRICTIVE VIBRATION-BASED ENERGY HARVESTER INDUCED BY INTERNAL FLUID FLOW USING SMART MATERIALS

Pedro Caetano Cardoso, pedrocaetano@poli.ufrj.br¹
Virgílio Junior Caetano, vj.caetano@mecanica.coppe.ufrj.br¹
Marcelo Amorim Savi, savi@mecanica.ufrj.br¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE – Mechanical Engineering, Center for Nonlinear Mechanics, Rio de Janeiro, Brasil

Abstract. Mechanical vibration is one of the most abundant energy available in the environment, consisting of an interesting source of waste energy that can be explored by energy harvesting systems. Piezoelectric vibration-based energy harvesters have received significant attention in the literature, having reached a degree of technical maturity and in some cases, cost-effectiveness, which justifies their broad use in diverse applications. Magnetostrictive energy harvesters, on the other hand, received little attention and may provide higher power density and lower output impedance. This work investigates an energy harvesting system based on smart material aiming at extracting energy from the lateral vibration of ducts conveying fluid. The harvesting device is composed of a smart material (magnetostrictive or piezoelectric) bounded to a cantilever-beam structure and coupled to an electrical circuit. The Euler-Bernoulli beam theory and the Galerkin method are employed, respectively, to model and discretize both systems, the duct and the energy harvesting device. The differential equations of motion are integrated employing the fourth-order Runge-Kutta method. Numerical simulations are carried out to establish the system performance and the influence of the generated output power due to velocity variations of internal flow as well as the comparison between smart materials.

Keywords: Energy harvesting, magnetostrictive material, pipe conveying fluid, fluid-structure interaction.