

DINÂMICA NÃO-LINEAR DE DISPOSITIVOS DE VIBRO-IMPACTO PARA COLHEITA DE ENERGIA

Lígia Pereira Silva de Oliveira, ligiapso@poli.ufrj.br¹
Virgílio J. Caetano, vj.caetano@mecanica.coppe.ufrj.br¹
Pedro V. Savi, pedrov.savi@mecanica.coppe.ufrj.br¹
Marcelo A. Savi, savi@mecanica.coppe.ufrj.br¹

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE – Engenharia Mecânica, Centro de Mecânica Não Linear - 21.941.972 - Rio de Janeiro – RJ

Resumo. *Sistemas piezoelétricos de colheita de energia baseados em vibração tem se mostrado promissores como fontes alternativas de energia para alimentar sensores e dispositivos eletrônicos de baixa potência, especialmente para atender regiões de difícil acesso onde a troca constante de baterias seria inconveniente e custosa. Dispositivos lineares de colheita de energia convencionais são projetados para atuar sob condições de ressonância, restringindo sua eficiência para situações em que a frequência de excitação ambiente está próxima à frequência natural do sistema. Baseado nesse cenário, o objetivo deste trabalho é explorar a introdução de não-linearidades não-suaves em dispositivos de colheita de energia convencionais por meio de impactos com batentes visando melhorar o desempenho do sistema em uma maior faixa de frequências de operação. Duas condições diferentes de vibro-impacto são exploradas: contato unilateral e bilateral. O sistema é modelado como osciladores mecânicos não-suaves acoplados a um circuito elétrico por meio de elementos piezoelétricos. As vibrações ambientes são consideradas harmônicas. O método de Runge-Kutta de quarta ordem é empregado na solução das equações diferenciais de movimento. Uma análise paramétrica é realizada visando estabelecer as melhores condições de desempenho do sistema. Os resultados mostram que o mecanismo com impacto pode proporcionar ganhos de largura de banda e eficiência do dispositivo, especialmente em condição de contato bilateral. Desta forma, dispositivos não-lineares de vibro-impacto se mostram interessantes para geração de energia de excitações com amplo espectro de frequência.*

Palavras-chave: *Colheita de energia, vibro-impacto, piezoelectricidade, dinâmica não-linear.*

1. INTRODUÇÃO

A questão energética tem se mostrado de essencial importância no século XXI, o que tem motivado a busca por formas de energia sustentáveis. Nesse sentido, novas fontes alternativas de energia têm sido propostas utilizando métodos não convencionais. A tendência no desenvolvimento de dispositivos associados à Internet das Coisas (IoT) tem alavancado o surgimento de sensores autônomos para aplicação em monitoramento e controle em campo, com demandas energéticas progressivamente menores e que evitem o uso de baterias ou tecnologias de armazenamento (Paradiso and Starner, 2005).

Nesse contexto, os denominados micro geradores de energia apresentam-se como uma alternativa promissora para transformar pequenas quantidades de energia presentes no ambiente em eletricidade, reduzindo a necessidade de trocas constantes de baterias (Sodano et al., 2004) culminando em dispositivos de maior vida útil (Bao et al., 2019; Clair et al., 2010; Nabavi et al., 2018).

Atenção especial tem sido dada aos geradores baseados na coleta de energia vibracional, por meio de elementos piezoelétricos, devido a simplicidade, alta densidade de potência e facilidade de miniaturização desses transdutores (Beeby et al., 2006). A configuração mais comum do coletor de energia vibracional explorada na literatura se baseia em uma viga em balanço associada a elementos piezoelétricos distribuídos ao longo do seu comprimento. Diversos estudos acerca dessa configuração linear foram testados e analisados ao longo dos anos (Erturk and Inman, 2008; Guizzetti et al., 2009; Liao and Sodano, 2008). A principal desvantagem desses dispositivos é a de que eles são eficientes somente sobre uma pequena faixa de frequências, em torno da condição de ressonância do sistema, perdendo consideravelmente sua capacidade de coletar energia quando a excitação ambiente se encontra distribuída sobre um maior intervalo de frequências.

Diversas estratégias tem sido exploradas buscando alargar essa banda de frequência (Zhou et al., 2020). A criação de sistemas contendo múltiplos graus de liberdade, como a realizada na configuração de tridente proposta por Upadrashta and Yang (2018), é capaz de aumentar a frequência de atuação desses dispositivos ao possuir picos de ressonância próximos. Entretanto, esses dispositivos apresentam vales de potência entre as frequências naturais do sistema, o que pode gerar baixa energia nesses intervalos.

A incorporação de não-linearidades tem se mostrado de grande relevância para melhorar o desempenho dos sistemas de colheita de energia. Nesse contexto, não-suavidades representadas por impedimentos ao movimento vibratório tem se mostrado uma alternativa interessante. Sistemas de vibro-impacto já se mostraram benéficos ao alargamento da banda de frequência (Liu et al., 2012; Soliman et al., 2008; Song et al., 2014; Zhou et al., 2020). Contudo, existem poucos trabalhos que exploram múltiplos impactos ou batentes com inércia.

O presente trabalho busca explorar a aplicação de não-suavidades em um sistema de colheita de energia vibracional piezoelétrico sujeito a forçamentos harmônicos por meio da adição de impactos com dois tipos diferentes de batentes mecânicos: com e sem inércia. Dois tipos de impacto são considerados: dois batentes de massa desprezível; e um sistema similar, onde um dos batentes possui inércia, sendo tratado como um segundo oscilador também associado a um elemento piezoelétrico. Os resultados produzidos sobre condições de contato unilateral e bilateral são investigados e uma análise paramétrica é realizada buscando mostrar as melhores condições de operação.

2. SISTEMA COM 1,5 GDL

Considere um sistema de colheita de energia de vibro-impacto que consiste de um sistema de 1,5-GDL, contendo 1-GDL mecânico e 0,5-GDL elétrico, sujeito a impactos com dois batentes de massa desprezível conforme mostrado na Figura 1. O sistema é modelado a partir de um oscilador mecânico central de massa m_0 suspenso por um elemento elástico de rigidez k_0 e um dissipador viscoso linear de coeficiente c_0 . Os dois batentes são descritos por um conjunto mola-amortecedor linear de rigidez: k_{b1} e k_{b2} ; e amortecimento c_{b1} e c_{b2} . O deslocamento do oscilador é representado por z_0 e a excitação de base por $y(t)$, considerado harmônico. As distâncias entre os batentes, superior e inferior, e o oscilador são dados, respectivamente, por d_1 e d_2 .

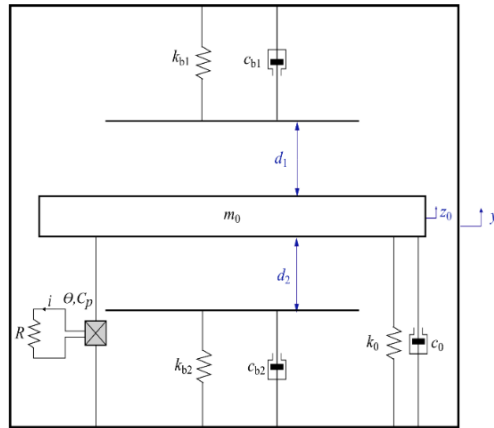


Figura 1. Modelo do gerador de energia piezoelétrico de 1,5-GDL.

A dinâmica do sistema apresenta três modos de resposta dinâmica, definidos de acordo com o deslocamento relativo do oscilador mecânico central em relação à base (z_0). Os três modos de resposta são descritos por uma equação de movimento para cada um dos modos: sem contato; em contato com o batente superior e em contato com o batente inferior:

$$m_0 \ddot{z}_0 + c_0 \dot{z}_0 + k_0 z_0 - \Theta E_0 = -m_0 \ddot{y}, \quad (d_2 < z_0 < d_1) \quad (1)$$

$$m_0 \ddot{z}_0 + (c_0 + c_{b1}) \dot{z}_0 + k_0 z_0 + k_{b1}(z_0 - d_1) - \Theta E_0 = -m_0 \ddot{y}, \quad (z_0 \geq d_1) \quad (2)$$

$$m_0 \ddot{z}_0 + (c_0 + c_{b2}) \dot{z}_0 + k_0 z_0 + k_{b2}(z_0 + d_2) - \Theta E_0 = -m_0 \ddot{y}, \quad (z_0 \leq -d_2) \quad (3)$$

onde $\ddot{y} = A \sin(\omega t)$ é o forçamento harmônico de base

O circuito elétrico conectado ao sistema mecânico através do elemento piezoelétrico é constituído por uma resistência elétrica R , voltagem E , capacitância C_p e acoplamento eletromecânico representado por Θ . A equação de governo do circuito elétrico é dada por:

$$\Theta \dot{z}_0 + C_p \dot{E}_0 + \frac{1}{R} E_0 = 0 \quad (4)$$

Simulações numéricas são realizadas a partir das equações de movimento considerando um forçamento harmônico no intervalo de frequências de 80–200 Hz. Os parâmetros do sistema de 1,5-GDL se encontram apresentados na Tabela 1. Inicialmente, uma análise paramétrica é realizada para avaliar a influência das rigidezes (k_{b1} , k_{b2}) bem como das distâncias (d_1 , d_2) sobre a capacidade de geração de energia do sistema. Para esse fim é conveniente definir as seguintes

variáveis adimensionais: $\beta_{bn}=k_{bn}/k_0$, $\zeta_{bn}=c_{bn}/c_0$ e $R_d=d_2/d_1$. O subscrito n indica o elemento mecânico referenciado, sendo os subscritos “0” o oscilador central, “1” o batente superior e “2” o inferior.

Tabela 1. Parâmetros do dispositivo de colheita de energia de 1,5-GDL.

$m_0(\text{kg})$	0,01756
$k_0(\text{Nm}^{-1})$	8300
$c_0 (\text{Nsm}^{-1})$	0,219
$A (\text{m/s}^2)$	2,5
$C_p (\text{F})$	$4,194 \times 10^{-8}$
$R (\Omega)$	100×10^3
$\Theta (\text{N V}^{-1})$	-0,004688

O desempenho do gerador de energia é avaliado considerando três métricas: potência elétrica (P), a potência elétrica média ($\bar{P}$) e a largura de banda em frequência (δ). A largura de banda de frequência é estimada aplicando a seguinte relação, $P(\omega_1) = P(\omega_2) = 0,5P_{max}$, em que $\delta = \omega_2 - \omega_1$ e P_{max} é o pico de potência gerada na curva de resposta em frequência da condição sem impacto (SI). A potência média é obtida da seguinte forma.

$$\bar{P} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (5)$$

em que $P(t) = E_0^2/R$ é a potência instantânea.

Considere inicialmente uma situação em que ocorre o contato unilateral. A Figura 2(a) mostra a resposta do sistema para diferentes espaçamentos d_1 . Observa-se que, conforme o espaçamento é reduzido, existe uma diminuição do deslocamento máximo devido à restrição do batente e, conseqüentemente, há ganhos na banda de frequência. Contudo, existe uma redução do pico máximo de amplitude. De forma similar, a Figura 2(b) mostra um desvio do pico máximo de deslocamento com o aumento da rigidez do batente. A curva de resposta do deslocamento tende a cobrir uma faixa maior de frequências com aumento da rigidez do batente.

A potência média obtida no intervalo de frequência simulado (80–200Hz) e a largura de banda são apresentados na Figura 2(c) e Figura 2(d), respectivamente, para diferentes espaçamentos e valores de rigidez. Os impactos entre o oscilador e o batente superior são benéficos à potência média e à largura de banda desenvolvida quando comparados aos resultados da condição sem impacto (SI). Note que o uso de batentes mais rígidos proporciona ganhos significativos ao longo do espectro de frequências, contudo, a capacidade de colheita de energia é comprometida quando a amplitude de oscilação se encontra excessivamente restrita ($d_1=10\mu\text{m}$). Por essa razão, adota-se a estratégia de meia potência para estimar a largura de banda a partir do pico de potência gerada para estimar a largura de banda.

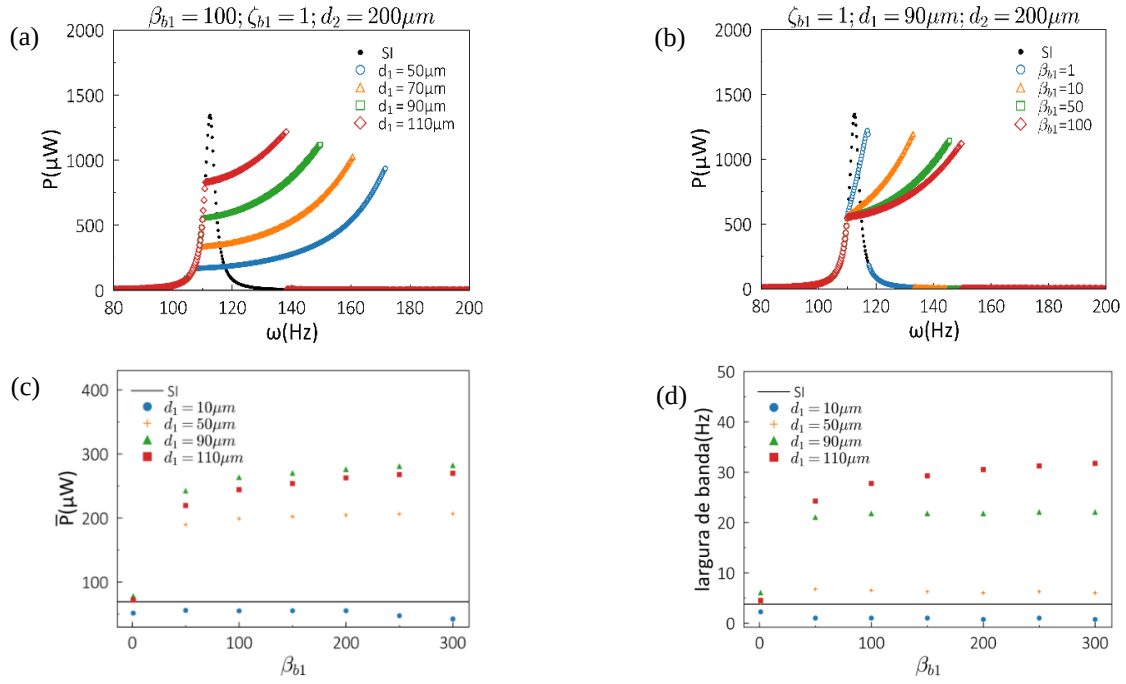


Figura 2. Influência do (a) distanciamento d_1 e de (b) β_{b1} sobre a potência resultante no espectro de frequências; (c) a potência média obtida e (d) a largura de banda desenvolvida no intervalo de 80 a 200 Hz para o gerador de energia de 1,5-GDL sujeito a contato unilateral.

Resultados considerando contato bilateral são apresentados na Figura 3, em que a folga em relação ao batente superior é mantida constante em $d_1 = 90\mu m$, assim como a razão de rigidez $\beta_{b1} = 10$ e amortecimento $\zeta_{b1} = 1$. A Figura 3(a) fornece o deslocamento máximo para diferentes distâncias entre massa-batente inferior. Conforme o espaçamento é estreitado, a região de contato com o batente inferior se amplia e provoca a movimentação da região de contato bilateral para frequências maiores, alargando a largura de banda de operação do dispositivo de colheita de energia. Melhores resultados são obtidos para altas rigidezes do batente inferior com alargamento de ambas as regiões de contato unilateral e bilateral como indicado pela Figura 3 (b). A Figura 3(c) mostra como as alterações nas folgas alteram a potência média coletada. Note que a capacidade de coletar energia é ampliada em decorrência de impactos com o batente inferior, comparando com o caso com contato unilateral.

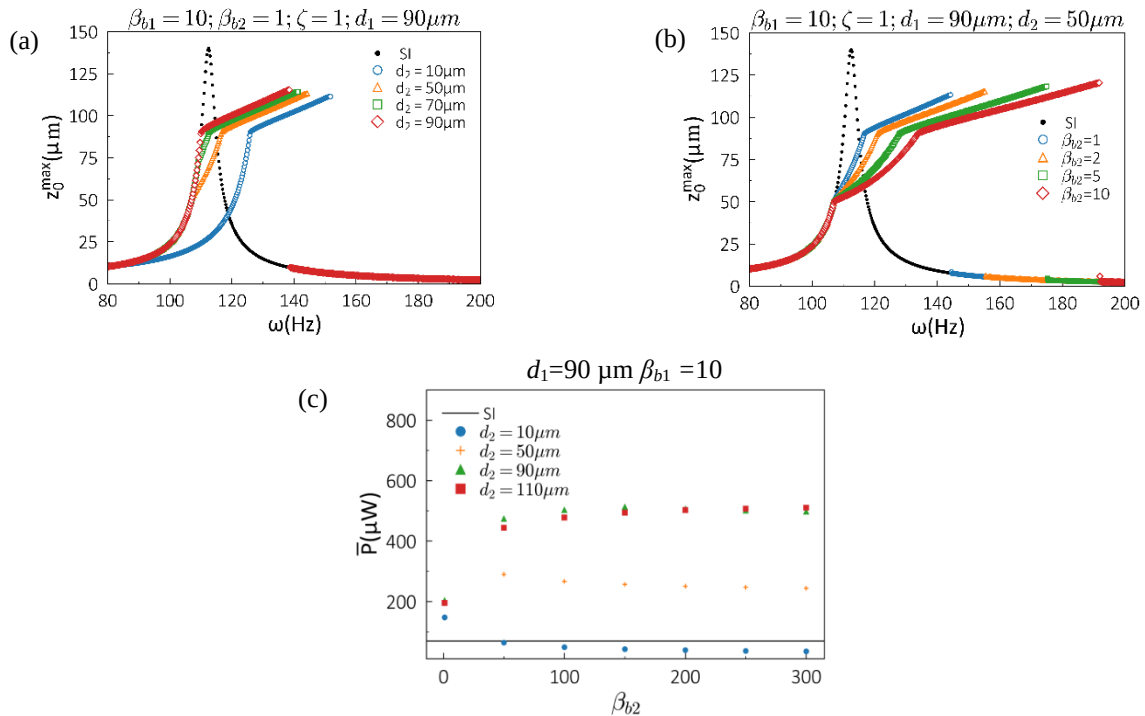


Figura 3. Influência do (a) distanciamento d_1 , de (b) β_{b2} sobre a potência resultante no espectro de frequências; (c) a potência média no intervalo de 80 a 200 Hz do gerador de energia de 1,5-GDL sujeito a contato bilateral.

3. SISTEMA COM 3-GDL

Considere um sistema de colheita de energia onde o batente superior possui inércia, sendo modelado como um oscilador linear de massa m_1 associado a um novo elemento piezoelétrico, conforme mostrado na Figura 4. O sistema apresenta 2-GDLs associados aos deslocamentos mecânicos z_0 e z_1 das massas m_0 e m_1 , respectivamente; e 1-GDL associado aos dois circuitos elétricos.

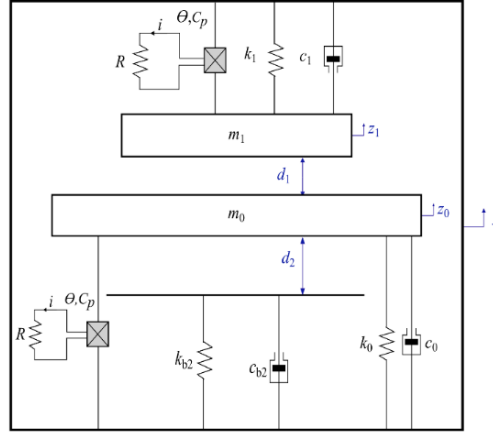


Figura 4. Modelo do gerador de energia de 3-GDLs

As equações de movimento consideram três modos de resposta (condição de contato da viga central com o batente inferior, movimento livre do batente superior e da viga central) onde o batente superior possui inércia. Desta forma, o sistema de equações de movimento é fornecido por:

$$m_0 \ddot{z}_0 + (c_0 + c_{b2}) \dot{z}_0 + k z_0 + k_{b2} (z_0 + d_2) - \Theta E_0 = -m_0 \ddot{y}, \quad (z_0 \leq d_2) \quad (6)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1 \dot{z}_1 + k_1 z_1 - \Theta E_1 = -m_1 \ddot{y}, \quad (z_1 > d_2) \quad (7)$$

$$m_0 \ddot{z}_0 + c_0 \dot{z}_0 + k_0 z_0 - \Theta E_0 = -m_0 \ddot{y}, \quad (z_0 > d_2) \quad (8)$$

As equações do sistema elétrico são apresentadas a seguir onde deve-se notar a adição de um novo elemento piezoelétrico no batente superior:

$$\Theta \dot{z}_0 + C_p \dot{E}_0 + \frac{1}{R} E_0 = 0 \quad (9)$$

$$\Theta \dot{z}_1 + C_p \dot{E}_1 + \frac{1}{R} E_1 = 0 \quad (10)$$

Nesse sistema podem ocorrer impactos entre as massas m_0 e m_1 , desta forma uma tolerância de 10^{-8} m é adotada nas simulações para a identificação do momento de impacto e as velocidades dos osciladores imediatamente após o impacto são determinadas conforme segue:

$$\dot{z}_{1+} = \frac{m_1 - \mu m_0}{m_1 + m_0} \dot{z}_{1-} + \frac{m_0 (1 - \mu)}{m_1 + m_0} \dot{z}_{0-} \quad (11)$$

$$\dot{z}_{0+} = \frac{m_0 - \mu m_1}{m_1 + m_0} \dot{z}_{0-} + \frac{m_1 (1 + \mu)}{m_1 + m_0} \dot{z}_{1-} \quad (12)$$

onde $\mu = 0,6$ é o coeficiente de restituição, e os subscritos “-” “e” “+” correspondem aos estados pré e pós impacto, respectivamente. Assume-se que não ocorrem situações em que as massas envolvidas no impacto se tornam associadas.

Os parâmetros do acoplamento elétrico (C_p , R , Θ) e de amplitude de forçamento (A) são mantidos os mesmos dos utilizados nas simulações do sistema de colheita de energia com 1,5-GDL. Os parâmetros do sistema de 3-GDLs são apresentados na Tabela 2. As mesmas métricas adotadas na seção anterior são utilizadas para avaliar o desempenho do gerador de energia, sendo que, neste caso, a potência instantânea é avaliada como $P(t) = (E_0^2 + E_1^2)/R$.

Tabela 2. **Parâmetros do dispositivo de colheita de energia de 3-GDLs.**

m_0 (Kg)	0,00878
k_0 (Nm ⁻¹)	4150
m_1 (Kg)	0,00878
k_1 (Nm ⁻¹)	4980
$c_0=c_1$ (Nsm ⁻¹)	0,219

O comportamento do sistema de 3-GDLs envolvendo contato unilateral, impacto entre o oscilador e o batente superior, estão apresentados Figura 5 para diferentes configurações de folga d_1 . A potência combinada fornecida pelos dois elementos piezoelétricos é apresentada na Figura 5(a), mostrando os dois picos associados aos dois osciladores. Os resultados mostram que a vibração do oscilador principal (m_0) tende a coletar mais energia para frequências elevadas em relação ao SI, enquanto o oscilador do batente (m_1) adota comportamento contrário com a redução do segundo pico de potência para espaçamentos menores. Por consequência, maior quantidade de energia é produzida no vale de potência da condição SI. O pico máximo adquirido pelo sistema chega a variar de 356,44 μ W (SI) para 594,79 μ W ($d_1=30\mu$ m).

A comparação entre as larguras de banda do sistema de 3-GDLs para diferentes distâncias d_1 , e as obtidas pelo sistema com 1,5-GDL com $\beta_{b1}=200$, ambos sujeitos a contato unilateral, é apresentada na Figura 5(c). Ao contrário do sistema envolvendo contato com batentes de inércia desprezível (1,5 GDL), os ganhos na frequência são limitados ao intervalo de frequência entre os dois picos de ressonância. Como consequência, a largura de banda não pôde ser expandida além da presente no caso SI. Somente para distanciamentos maiores o sistema de 1,5-GDL apresenta ganhos de largura de banda, enquanto o sistema de 3-GDLs, contendo massas em impacto, apresenta melhor distribuição de energia quando o sistema apresenta folgas pequenas.

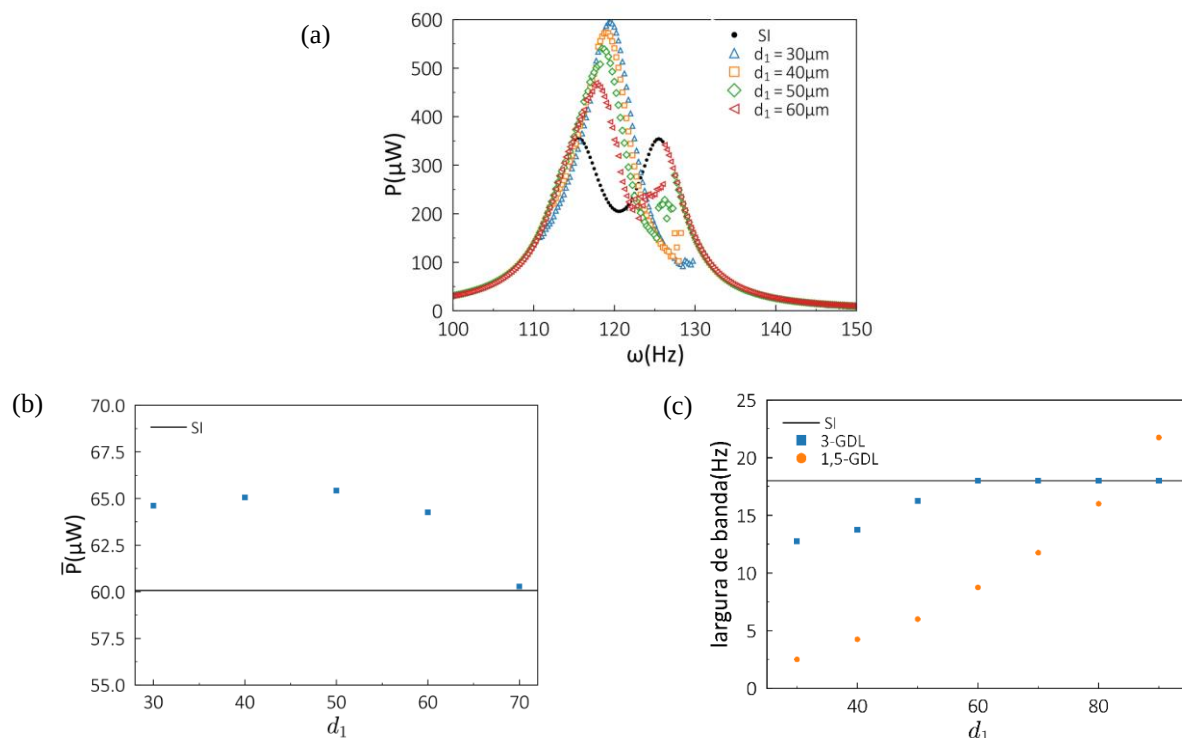


Figura 5. **Resultados do sistema de 3-GDLs sob contato unilateral ($d_2=200\mu$ m).** (a)Espectro de potência, (b) potência média produzida e (c) comparação das larguras de banda do sistema de 3-GDLs e 1,5-GDL ($\beta_{b1}=200$) para diferentes distâncias d_1 .

As respostas do sistema sujeito ao contato bilateral da viga com o batente superior e inferior são apresentadas na Figura 6 e Figura 7. A interferência mais pronunciada do batente inferior se mostra desejável como indicado pelas simulações envolvendo diferentes folgas d_2 e rigidezes β_{b2} presentes na Figura 6(a) e na Figura 6(b), respectivamente. Dentre as diferentes configurações utilizadas, a melhor conversão de energia ocorre quando $d_1=50$ e $d_2= 62,5\mu$ m que eleva a potência máxima gerada pelo coletor de 356,44 μ W (SI) para 644,158 μ W, representando um incremento de 80,72% comparado ao sistema linear. Adicionalmente, o aumento da razão de rigidez entre o oscilador central e o batente inferior resultam em melhor desempenho do dispositivo dentro do intervalo de frequência testado, visto que eleva o pico de

potência de 509,09 μ W até 618,46 μ W ao ser alterado de $\beta_{b2}=1$ a $\beta_{b2}=50$, além de aumentar a potência média produzida em até 14% (de 64,21 μ W a 73,20 μ W) como mostrado na Figura 7(a).

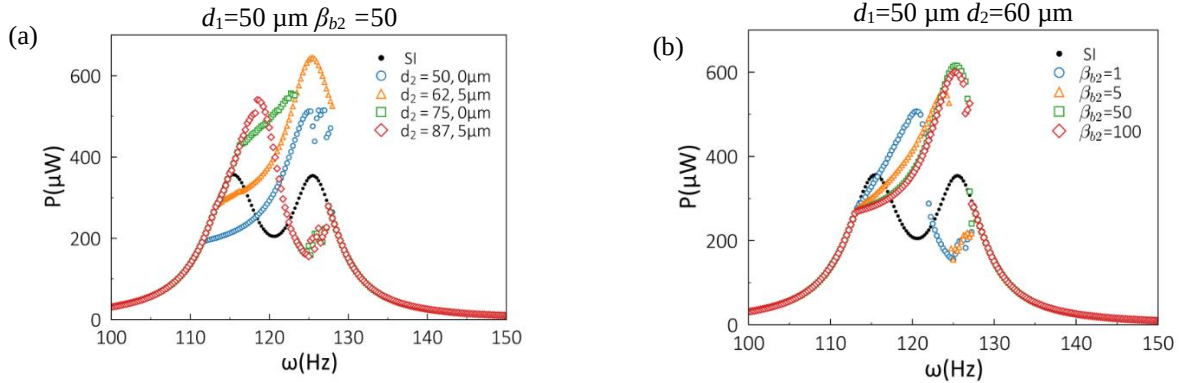


Figura 6. Espectro de potência do sistema de 3-GDLs sob contato bilateral para diferentes (a) distâncias d_1 e (b) rigidezes β_{b2} .

Entretanto, rigidezes que superam $\beta_{b2}=50$ se mostram desfavoráveis para a potência do coletor de energia. Portanto, limitar β_{b2} parece ser a estratégia mais conveniente, conforme mostrado na Figura 7(c). Visto que a elevação da rigidez do batente inferior não provoca mudanças significativas após $\beta_{b2}=50$. A Figura 7(b) mostra que a configuração mais apropriada para a produção de energia bem distribuída é a condição onde $d_1=50$ e $d_2=62,5$ e $\beta_{b2}=50$ que desenvolve uma potência média de 78,93 μ W que é 20,6% maior que a máxima alcançada pelo sistema contendo somente impactos entre o oscilador e o batente superior (65,43 μ W).

O benefício do contato bilateral pode ser visto mais claramente observando a largura de banda na Figura 7(d). A diminuição da largura de banda advinda do aumento da razão entre as folgas (R_d) mostra como a interferência mais proeminente do batente sem massa contribui para uma melhor distribuição da energia coletada.

Em todas as configurações de distanciamento simuladas, cuja potência média resultante encontra-se na Figura 7(b), há valores para R_d que maximizam a potência média fornecida pelo sistema de colheita de energia, indicando a importância da análise paramétrica para identificação da melhor condição de operação.

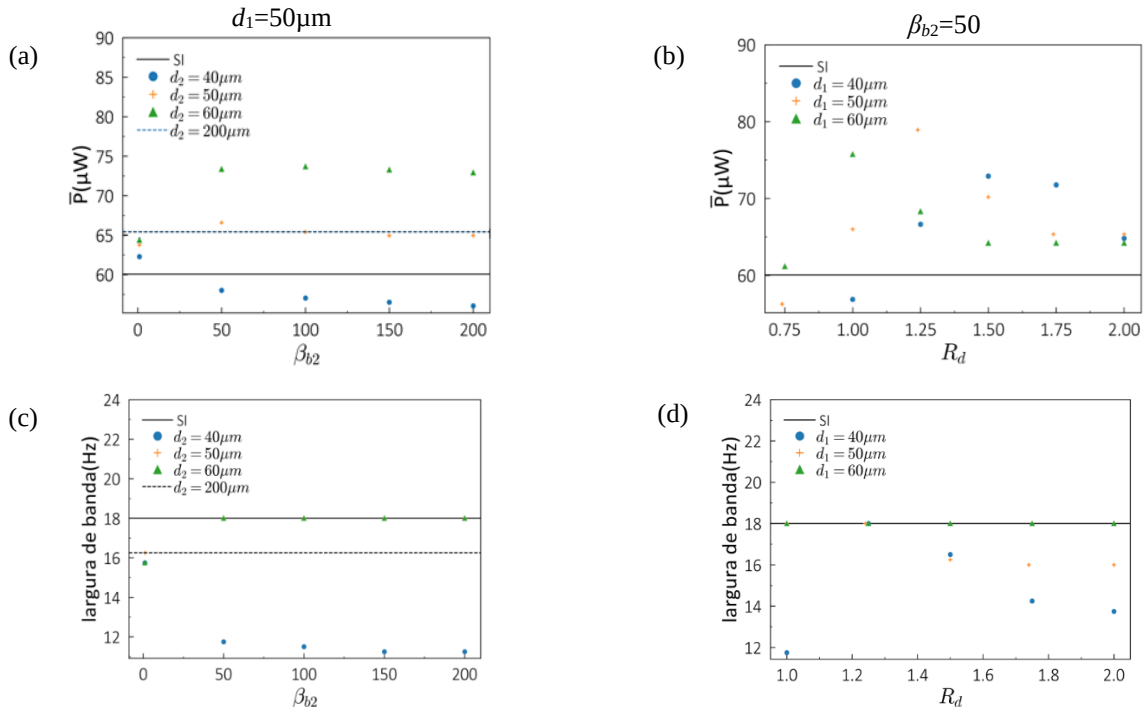


Figura 7. Potência média desenvolvida pelo coletor de energia de 3-GDL sob contato bilateral para diferentes distanciamentos d_2 em função (a) de β_{b2} e (b) de R_d ; e larguras de banda correspondentes em função de (c) β_{b2} e (d) R_d .

4. CONCLUSÕES

Este trabalho tem como objetivo investigar os efeitos das não-linearidades não-suaves em dispositivos de colheita de energia convencionais por meio de impactos com batentes providos ou não de inércia. Dois sistemas distintos são propostos: 1,5-GDL e 3-GDLs. São realizadas simulações numéricas incluindo duas condições de vibro-impacto: unilateral e bilateral. Os resultados mostram ganhos na largura de banda e na eficiência nos dois modelos investigados quando comparados a sistemas sem contato. O sistema com contato bilateral considerando um batente com inércia (3-GDLs) apresenta os melhores resultados para colheita de energia no quesito de geração máxima de potência, sendo indicado quando a excitação ambiente não se encontra dispersa sobre uma ampla faixa de frequências. Desta forma, os batentes com inércia mostraram-se benéficos à coleta de energia, porém os ganhos na potência média obtida são menos significativos quando comparados aos alcançados para o caso de batentes sem massa do sistema de 1,5-GDL. No sistema de 3-GDL, o impacto entre as massas da viga e do batente superior mostra-se vantajoso na obtenção de maiores larguras de banda para pequenos espaçamentos. Os impactos, especialmente nas condições de contato bilateral, tendem a aumentar a largura de banda e, por consequência, a potência média coletada, apresentando uma melhor eficiência nos coletores piezoelétricos. Este trabalho mostra como as análises dinâmica e paramétrica do sistema são extremamente importantes tendo em vista a grande sensibilidade dos resultados aos parâmetros, especialmente relacionado as folgas entre a viga e os batentes. O sistema de 3-GDL mostra-se mais indicado quando se deseja manter alta potência sobre uma janela de frequência relativamente pequena, enquanto o sistema de 1,5-GDL é mais apropriado para situações em que a vibração ambiente se encontra dispersa sobre uma ampla faixa de frequência.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Bao, B., Chen, W. and Wang, Q. , 2019. "A piezoelectric hydro-energy harvester featuring a special container structure". *Energy*, 189, 116261. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116261>
- Beeby, S. P., Tudor, M. J. and White, N. M. , 2006. "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications". *Measurement Science and Technology*, 17(12). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/12/R01>
- Clair, D., Bibo, A., Sennakesavababu, V., Daqaq, M. and Li, G. , 2010. "A scalable concept for micropower generation using flow-induced self-excited oscillations". *Applied Physics Letters*, 96.
- Erturk, A. and Inman, D. J. , 2008. "Issues in mathematical modeling of piezoelectric energy harvesters, Smart Materials and Structures". *Smart Material Structures*, 17, 1–14.
- Guizzetti, M., Ferrari, V., Marioli, D. and Zawada, T. , 2009. "Thickness Optimization of a Piezoelectric Converter for Energy Harvesting". *Proceedings of the COMSOL Conference*, 1–5.
- Liao, Y. and Sodano, H. A. , 2008. "Model of a single mode energy harvesting and properties for optimal power generations". *Smart Materials and Structures*, 17, 14.
- Liu, H., Lee, C., Kobayashi, T., Tay, C. J. and Quan, C. , 2012. "Investigation of a MEMS piezoelectric energy harvester system with a frequency-widened-bandwidth mechanism introduced by mechanical stoppers". *Smart Materials and Structures*, 21(3). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/3/035005>
- Nabavi, S. F., Farshidianfar, A. and Afsharfard, A. , 2018. "Novel piezoelectric-based ocean wave energy harvesting from offshore buoys". *Applied Ocean Research*, 76(May), 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.05.005>
- Paradiso, J. A. and Starner, T. , 2005. "Energy scavenging for mobile and wireless electronics". In *IEEE Pervasive Computing* (Vol. 4, Issue 1, pp. 18–27). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2005.9>
- Sodano, H. A., Inman, D. J. and Park, G. , 2004. "A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials". *Shock and Vibration Digest*, 36(3), 197–205. <https://doi.org/10.1177/0583102404043275>
- Soliman, M. S. M., Abdel-Rahman, E. M., El-Saadany, E. F. and Mansour, R. R. , 2008. "A wideband vibration-based energy harvester". *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18(11).

<https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/11/115021>

Song, M., Zhang, Y., Peng, M. and Zhai, J. , 2014. "Low frequency wideband nano generators for energy harvesting from natural environment". *Nano Energy*, 6, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.02.009>

Upadrashta, D. and Yang, Y. , 2018. "Trident-Shaped Multimodal Piezoelectric Energy Harvester". *Journal of Aerospace Engineering*, 31(5), 04018070. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)as.1943-5525.0000899](https://doi.org/10.1061/(asce)as.1943-5525.0000899)

Zhou, K., Dai, H. L., Abdelkefi, A. and Ni, Q. , 2020. "Theoretical modeling and nonlinear analysis of piezoelectric energy harvesters with different stoppers". *International Journal of Mechanical Sciences*, 166(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105233>

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

NON-LINEAR DYNAMICS OF VIBRO-IMPACT DEVICES FOR ENERGY HARVESTING

Lígia Pereira Silva de Oliveira, ligiapso@poli.ufrj.br¹

Virgilio J. Caetano, vj.caetano@mecanica.coppe.ufrj.br¹

Pedro V. Savi, pedrov.savi@mecanica.coppe.ufrj.br¹

Marcelo A. Savi, savi@mecanica.coppe.ufrj.br¹

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE -Department of Mechanical Engineering, Center for Nonlinear Mechanics - 21.941.972 - Rio de Janeiro – RJ

Abstract. *Vibration-based piezoelectric energy harvesting systems have shown to be promising as alternative energy sources to power sensors and low-power electronic devices, especially to supply remote or difficult access regions where constant battery replacement would be inconvenient and costly. Conventional linear energy harvesting devices are designed to operate under resonance conditions, which reduces the efficiency for situations where the ambient excitation frequency is close to the system natural frequency. Based on this scenario, the objective of this work is to explore the introduction of non-smooth nonlinearities in conventional energy harvesting devices through impacts with stops, improving system performance over a wider range of operating frequencies. Two vibro-impact configurations are explored: unilateral and bilateral contact. The system is modeled as non-smooth mechanical oscillators coupled to an electrical circuit through piezoelectric elements. Ambient vibrations are considered to be harmonic. The fourth-order Runge-Kutta method is used to solve the differential equations of motion. A parametric analysis is performed in order to establish the best performance conditions for the system. Results show that the impact mechanism can provide bandwidth and device efficiency gains, especially in bilateral impact condition. In this regard, nonlinear vibro-impact devices proved to be interesting for generating energy from excitations with a wide frequency spectrum.*

Keywords: *Energy Harvesting, vibro-impact, piezoelectricity, nonlinear dynamics.*