

Colheita de energia vibracional utilizando materiais piezoelétricos

Vibration energy harvesting using piezoelectric materials

Ana Carolina Cellular Massone*

Sabrina de Oliveira Reis**

Flavio Maggesi Viola***

Resumo

A procura por fontes alternativas de energia tem crescido cada vez mais no cenário mundial. E o conceito de sustentabilidade aparece com força total para diminuição da degradação ambiental gerada por esse grande consumo energético. Nesse sentido, a colheita de energia representa um papel predominante nesse cenário. Colheita de energia é o processo pelo qual a energia proveniente de fontes externas, tais como energia solar, eólica, vibracional, dentre outras pode ser transformada em energia elétrica. A energia cinética que máquinas ou organismos disponibilizam para o meio é chamada de vibracional e pode ser transformada em energia elétrica a partir dos materiais piezoelétricos. O objetivo desse trabalho é apresentar o processo de colheita de energia vibracional e os principais desafios para geração de energia útil. Serão apresentados estudos na área contendo não linearidades e caos no sistema gerador de energia a partir de materiais piezoelétricos. Essas não linearidades podem estar caracterizadas na rigidez do material, no acoplamento do circuito elétrico ou no próprio circuito elétrico. A excitação de base do sistema pode ser harmônica, randômica e harmônica-randômica.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Colheita de energia. Materiais piezoelétricos.

* Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro; Professora no Centro Universitário La Salle do Rio de Janeiro, na Universidade Cândido Mendes e na Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil; Email: anacellular1@yahoo.com.br

** Empresa Nitnudos, Niterói, RJ, Brasil; Email: sabrinareis95@hotmail.com

*** Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ; Professor na Universidade Cândido Mendes, Brasil; Email: fmviola@gmail.com

Abstract

Demand for alternative sources of energy has grown steadily on the world stage. And the concept of sustainability appears in full force to reduce the environmental degradation generated by this great energy consumption. In this sense, energy harvesting plays a predominant role in this scenario. Energy harvesting is the process by which energy from external sources such as solar, wind, vibrational, and others can be transformed into electrical energy. The kinetic energy that machines or organisms make available to the environment is called vibrational energy and can be transformed into electrical energy from piezoelectric materials. The objective of this paper is to present the process of vibrational energy harvesting and the main challenges for useful energy generation. Studies will be presented in the area containing nonlinearities and chaos in the power generator system from piezoelectric materials. These nonlinearities may be embedded in the material rigidity, electrical circuit coupling and the electrical circuit itself. The base excitation of the system can be harmonic, random and harmonic-random.

Keywords: Sustainability. Harvesting energy. Piezoelectric materials.

Introdução

A energia é um aspecto essencial no mundo contemporâneo tendo relação com quase todas as atividades humanas, incluindo transporte, aquecimento/refrigeração e processos industriais. Com isso, o processo de degradação ambiental aumenta em fatores exponenciais para gerar toda essa energia. Nesse sentido, o desenvolvimento sustentável passa a ser uma questão essencial para a sociedade. E devemos contar cada vez mais com pesquisas que promovam inovações nesse setor para tentar minimizar os danos causados ao meio ambiente. Fontes alternativas de energia constituem um dos maiores desafios para assegurar a sustentabilidade das gerações futuras.

O principal conceito de sustentabilidade é promover a exploração de áreas ou recursos prejudicando o menos possível o equilíbrio entre o meio ambiente, as comunidades humanas e toda a biosfera (CMMAD, 1988). Considerando a sustentabilidade como premissa, o entende-se colheita de energia como o processo pelo qual a energia proveniente de fontes externas,

como energia solar, vibrações, energia eólica, pode ser capturada e armazenada. As fontes “Vibracionais” capturam a energia mecânica que máquinas ou organismos liberam para o meio e convertem em energia elétrica. A colheita de energia vibracional mais comum é a partir de materiais piezoelétricos.

O conceito de colheita de energia surgiu como uma alternativa para fornecimento de energia em aparelhos eletrônicos móveis, nestes últimos dez anos. Essa energia pode ser consumida de forma direta ou pode ser armazenada, constituindo uma fonte renovável e limpa. Embora a escala da energia não seja significativa, pode ser suficiente para dispositivos com tecnologias de baixo consumo, como por exemplo, a carga de um aparelho celular, utilização de redes *wi-fi* e acionamento de um painel de LED (ERTURK; INMAN, 2009). Essa nova tendência de baixo consumo de energia proporciona a disseminação das tecnologias para aplicações industriais e ambientais, aumento nas pesquisas e investimentos relacionados ao conceito de Colheita de Energia (*Energy Harvesting*).

Dias, De Marqui Jr e Erturk (2013) discutiram colheita de energia em sistemas aeroelásticos combinando geração de energia com a redução de vibrações indesejáveis. Abordagens experimentais e numéricas mostram resultados interessantes em termos de colheita de energia, principalmente em relação a energia coletada (DE MARQUI JR; Ibid, 2013).

As vibrações de sistemas micro-eleto-mecânicos (MEMS) também podem ser exploradas para gerar energia (SHEN et al., 2009; HARB, 2011). Inman e Priya (2009) investigaram os efeitos de vibrações aleatórias de banda larga em um sistema de colheita de energia. Erturk e Inman (2011) trataram variações nos tipos de não-linearidades na parte mecânica do sistema comparando um sistema piezoelástico e um piezo-magneto-elástico. O piezo-magneto-elástico apresenta um comportamento similar ao oscilador do tipo *Duffing*.

A análise de sistemas de acoplamento eletromecânico também são investigados com o intuito de melhorar o desempenho do sistema (Erturk; Inman, 2009; Erturk; Inman, 2011). Triplett e Quinn (2009) investigaram o acoplamento eletromecânico não-linear de materiais piezoelétricos e,

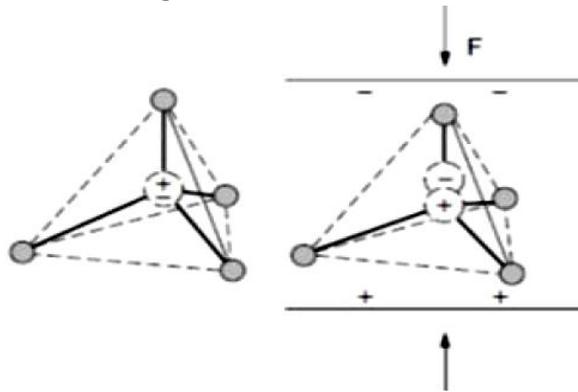
também, alguns aspectos relacionados com as não-linearidades mecânicas na colheita de energia baseada em vibração. Silva et al. (2013) investigaram a influência do comportamento histerético do material piezoelétrico na colheita de energia baseada em vibração.

O objetivo do trabalho é fazer uma revisão de literatura contemplando o processo de colheita de energia vibracional a partir de materiais piezoelétricos até os principais desafios dos próximos anos para a geração de energia. Todas as atenções são dedicadas à análise de aspectos dinâmicos dos sistemas de colheita de energia. O desempenho do sistema é o foco principal e será discutido durante todo o processo. A análise metodológica se deu por revisão de literatura de autores nacionais e internacionais renomados na área, estudos sobre protótipos com materiais piezoelétricos e modelagem com simulações numéricas distintas contemplando análises dinâmicas não lineares de geração de energia.

1. Material Piezoelétrico

A piezoeletricidade foi encontrada pelos irmãos Pierre e Jacques Currie em 1880. Os irmãos perceberam que aplicando uma pressão a um cristal de quartzo esse gerava cargas elétricas em sua superfície. A presença da piezoeletricidade é definida pela ausência de centro de simetria no cristal. Quando não há centro de simetria, os íons positivos e negativos se movimentam um em relação ao outro produzindo dipolos elétricos (polarização). Quando uma força é aplicada, essa polarização gera um campo elétrico, transformando energia mecânica utilizada na deformação do material em energia elétrica, conforme podemos ver na Figura 1 a seguir.

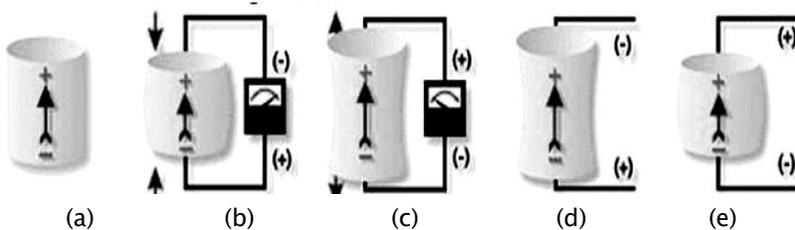
Figura 1 - Piezoelectricidade



Fonte: Schwartz (2002).

A utilização dos materiais piezoelétricos pode ser feita de dois modos: efeito direto e inverso. O efeito direto é aquele onde é aplicada uma tensão mecânica e se tem como resposta um campo elétrico (sensores). Já o efeito inverso é aquele que, quando submetido a um campo elétrico, produz uma deformação no material (atuadores). Após o processo de polarização que alguns materiais têm que sofrer para se tornarem piezoelétricos, como o Titanato zirconato de chumbo (PZT) que transforma 80% da energia mecânica em elétrica, ocorre o que podemos ver na Figura 2, sendo: Em (a), quando o material apresenta piezoelectricidade; Em (b) e (c) mostram o deslocamento elétrico gerado quando o material é submetido a compressão e tração; E em (d) e (e) mostra a expansão e contração do material respectivamente através da indução de um campo elétrico.

Figura 2 - Efeito direto e indireto de um material piezoelétrico



Fonte: GmbH e KG (2006).

Os materiais piezoelétricos podem suportar grande quantidade de tensão mecânica, além de possuir flexibilidade quanto ao tipo de material a ser utilizado.

Os avanços tecnológicos ao longo da última década, especialmente na micro e nanotecnologia, têm provido importantes desenvolvimentos aos dispositivos eletrônicos, como a redução no tamanho e no consumo de energia e consideráveis variedades de dispositivos sem fio. Com isso, percebe-se um aumento na demanda por sistemas eletrônicos alto-alimentados os quais têm sido empregados em diferentes aplicações (ZHU; WORTHINGTON, 2009, PINA et al, 2010 e JORNET; AKYILDIZ, 2012).

Níveis de vibrações úteis para um material piezoelétrico podem ser encontrados em uma grande quantidade de aplicações que incluem: o movimento do corpo humano; aparelhos domésticos e de uso pessoal; movimentos de estruturas tipo automóveis, aviões, prédios e pontes. A energia elétrica resultante do processo de colheita de energia depende da quantidade de energia cinética do movimento (vibração) e do poder de conversão elétrica. Em aplicações industriais, usualmente existe um nível alto de vibrações harmônicas disponíveis e a conversão elétrica se torna viável e de fácil transformação (WILLIAMS; YATES, 1996). O estudo que segue relata pesquisas relevantes na área de piezoeletricidade que retratam assuntos como: transformação de energia mecânica em elétrica, eficiência dos materiais piezoelétricos, quantidade de energia gerada por uma placa cerâmica PZT.

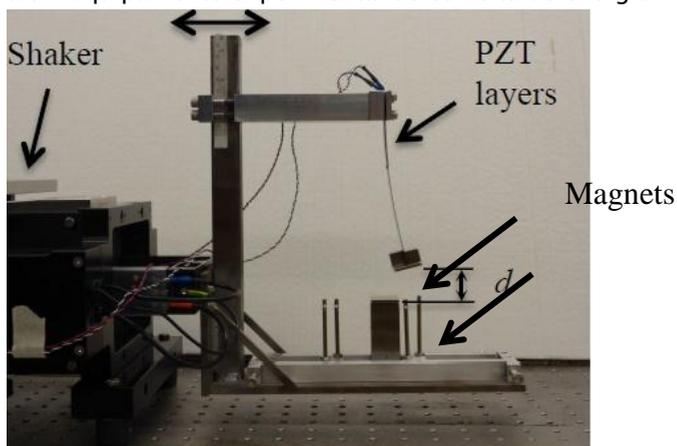
Dentre os tipos do material piezoelétrico, o PZT destaca-se pela eficácia na conversão da energia mecânica aplicada em energia elétrica. Esses materiais sintéticos podem ser constituídos por cerâmicos ou polímeros e são usados extensivamente para transdutores eletromecânicos e eletroacústico. O dispositivo piezoelétrico pode ter várias formas para alcançar diferentes modos de vibração. O modo de vibração ditará a captação de energia (GAIOTTO, 2012).

Piezoelétricos têm sido bastante aplicados e testados para usos de redes sem fio, geração de energia limpa e mecanismos que precisem gerar ondas vibratórias, utilizando o processo inverso neste último. O uso desses

mecanismos quando acoplados ao ser humano para transformação de energia possibilitam o surgimento de novas inovações em tênis, mochilas, pisos, além de outras aplicações. Assim, a colheita de energia baseada em vibração pode ser empregada em sistemas reais como asas de aviões, em pontes ou no tênis ao caminhar.

Em laboratório são feitas análises a fim de aproveitar o máximo possível da energia mecânica gerada nesses sistemas. Podemos ver um desses mecanismos na Figura 3 a seguir, onde o sistema mecânico é dado por um *shaker* que gera uma excitação de base. Na figura, o piezoelétrico está engastado em um de seus lados enquanto, no outro lado, um ímã é colocado. Outro ímã é colocado na base do mecanismo a fim de promover uma força de restituição não linear onde d é o deslocamento sofrido pelo piezoelétrico. Um circuito elétrico é instalado no sistema piezoelétrico a fim de medir a energia elétrica de saída.

Figura 3 - Equipamento experimental de colheita de energia



Fonte: De Paula, Inman e Savi, 2015.

1.1 Colheita de energia a base de vibração

A palmilha coletora é um sistema utilizado a fim de coletar energia a partir da caminhada ou corrida do utilizador. Quando aplicada a um tênis, é capaz de converter a energia mecânica do peso do corpo ao realizar determinados movimentos de diferentes intensidades. O sistema consiste em

uma palmilha com piezoelétrico que reveste o interior do calçado. A energia gerada é armazenada em uma bateria ou pode ser utilizada de forma direta para carregar dispositivos móveis, conforme podemos ver na Figura 4 (a). A Figura 4 (b) apresenta um sistema de salto coletor, onde o diferencial da coleta de energia em relação ao sistema anterior é a posição do coletor no salto do sapato. Segundo Howells (2009), o desenvolvedor, afirma que não há desconforto ou alteração no design do calçado.

Figura 4 - (a) Protótipo de uma palmilha piezoelétrica e (b) Gerador em forma de salto de sapato



(a)



(b)

Fonte: (a) Mateu e Moll (2006) e (b) Howells, (2009).

Outro sistema de conversão em pesquisa foi desenvolvido através de camadas de atuadores colocados nas alças da mochila para receber a força gerada pelo peso, conforme figura 5. Como podemos ver, o sistema converte a energia mecânica gerada pelo peso da mochila e o andar do utilizador em energia elétrica. Desta forma, a energia de elétrica varia de acordo com o movimento da mochila. Gonçalves (2011) mostraram resultados satisfatórios com este tipo de dispositivo, onde é possível obter um valor de potência média igual a 90,3 mW por passada.

Figura 5 – Colheita de energia através de uma mochila



Fonte: Feenstra, Granstrom e Sodano (2008).

Na Holanda existe uma boate, “Sustainable Dance Club”, em que o piso é feito de materiais piezoelétricos propiciando a geração de 10% da energia consumida pela boate em dia de grande movimento (“Energy Floors”), Fig. 6 (a). Em Tóquio na estação Marunouchi North, foi instalado um sistema de “chão de geração de energia” sendo essa energia aproveitada para cobrir parte do potencial elétrico gasto com as catracas e telas eletroluminescentes, Fig. 6 (b).

Figura 6 – (a) Estação de Tóquio; (b) Piso da boate



(a)



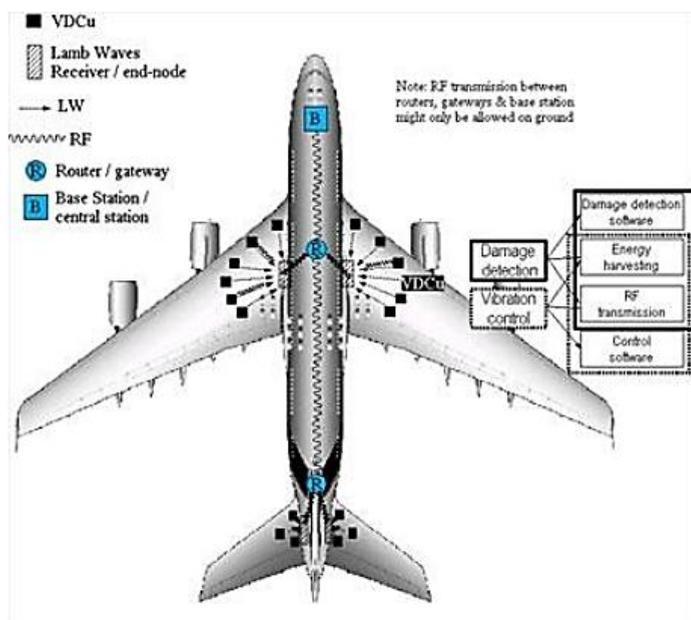
(b)

Fonte: Cellular (2016)

Os materiais piezoelétricos possuem forte relação com a indústria aeroespacial. Conforme aponta Cellular (2016), utilizando-o como sensor em aviões, a energia gerada pode alimentar pequenos circuitos da aeronave e reduzir vibrações críticas em suas asas. Outro procedimento é o processo de

atuação, que consiste em usar o efeito inverso do sistema piezoelétrico. Colocado sobre as asas do avião, a cada deformação permanente no material, esse piezoelétrico envia sinais elétricos para um circuito que identifica sua localização evitando relevantes danos estruturais, conforme podemos ver na Figura 7.

Figura 7 – Avião com sensores piezoelétricos



Fonte: Cenaero.¹

2. Principais desafios

A energia útil gerada por um piezoelétrico é na faixa de mW demasiada pequena para grandes circuitos, mas suficiente para redes *wi-fi*. Considerando a bibliografia pesquisada e os sistemas anteriormente apresentados, os principais desafios destas tecnologias para os próximos

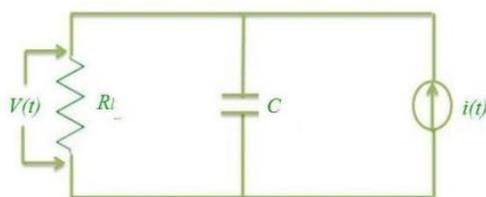
¹ <http://www.cenaero.be/Page_Generale.asp?DocID=24706&la=1&langue=EN>.

anos estão no aumento da energia gerada no sistema e a transformação dessa energia em energia elétrica sem perdas significativas.

Como as vibrações mecânicas são provenientes do meio, a variação da tensão de saída é imprevisível. Sua amplitude depende das características do elemento piezoelétrico, de suas dimensões e, também, das vibrações mecânicas. Por isso, a escolha da interface eletrônica, que corresponde à transformação da energia em energia útil (energia elétrica), é de suma importância, garantindo a compatibilidade de tensão entre o elemento piezoelétrico e o terminal de carga elétrica.

Um elemento de armazenamento de energia elétrica, como um capacitor ou uma bateria eletroquímica, pode ser incluído também para compensar uma redução temporária do nível de vibrações do ambiente ou superar um pico de potência consumida pela carga eletrônica. Portanto, adequar o circuito ideal é um grande desafio na era moderna para aumentar a potência de transformação da energia de forma eficiente. O circuito elétrico composto pelo elemento piezoelétrico e a resistência pode ser representado por um circuito resistor-capacitor (RC) mostrado na figura 8, onde R é a resistência do piezoelétrico, C a capacitância, V é a tensão elétrica gerada pelo piezoelétrico e I é a corrente elétrica, sendo um circuito simples para utilização em testes laboratoriais.

Figura 8 – Circuito acoplado ao elemento piezoelétrico



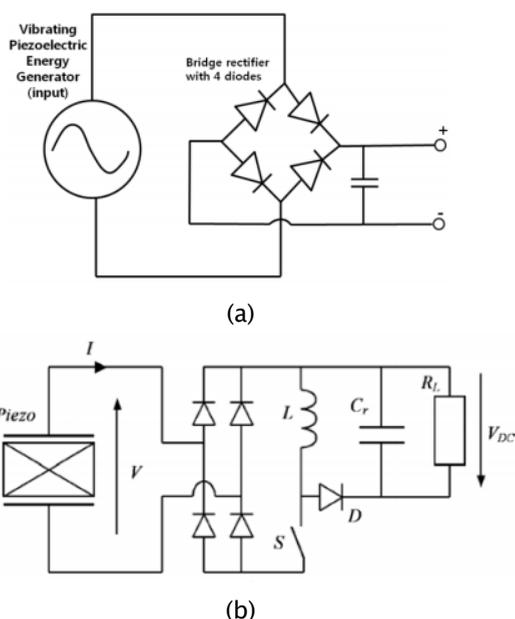
Fonte: Autor.

A fim de melhorar a eficiência do circuito de colheita de energia Kim, Kim e Kim (2011) propõem uma completa retificação da onda de vibração do

dispositivo piezoelétrico. Para isso, foi utilizada uma ponte com quatro diodos D acoplada ao circuito. Verificou-se uma eficiência de 84%, conforme podemos ver na Figura 9 (a).

A Figura 9 (b) possui um circuito mais complexo com indutores L, capacitores e resistores acoplados ao piezoelétrico, a fim de aumentar a potência de saída. Ambos são mais eficientes na captação de energia vibracional a partir de materiais piezoelétricos.

Figura 9 – (a) Circuito tipo de onda – ponte completa de retificação de energia vibracional para piezoelétrico; (b) circuito de extração de carga Synchronous com um indutor L e um interruptor S26

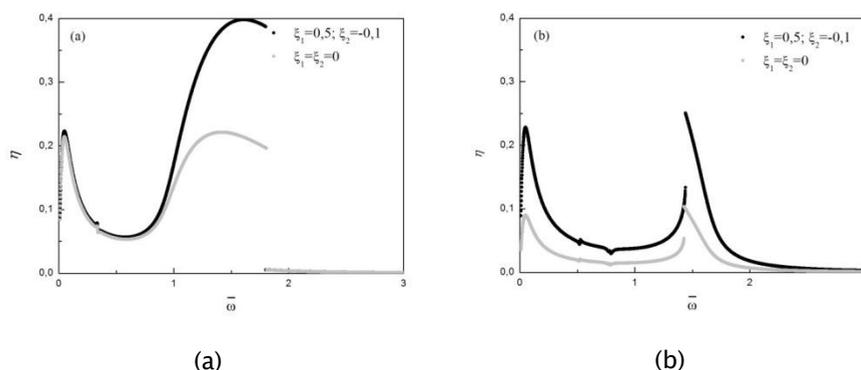


Fonte: Kim, Kim e Kim (2011)

Outra forma de aumentar a energia de saída é aumentar a energia gerada. Para isso, as não-linearidades possuem fator preponderante. Conforme aponta Cellular et. al (2018), se a excitação no piezoelétrico for periódica e não tiver nenhuma não linearidade, a região do pico de potência é bem curta e a ressonância é o lugar onde se tem a maior potência gerada.

Logo, as não linearidades, além de aumentarem a potência gerada, aumentam também à banda dos picos, conforme apresentado na Figura 10.

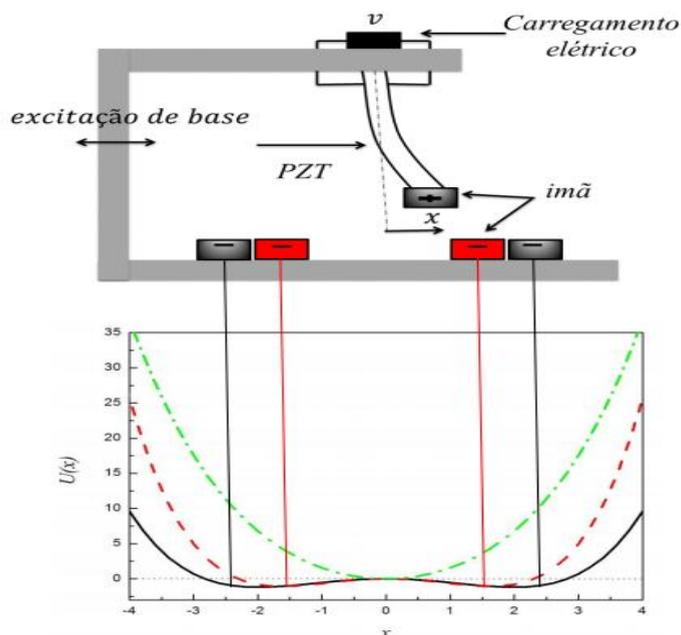
Figura 10 – Eficiência x frequência de forçamento comparando o acoplamento linear e não linear para os sistemas (a) monoestável e (b) biestável



Fonte: autor.

As não-linearidades mais consideradas estão no sistema mecânico. Uma primeira aproximação é considerar a força de restituição do tipo *Duffing*, gerando assim sistemas monoestáveis e biestáveis. De acordo com a Figura 11, um PZT-magnético é fixado a um sistema que possui uma excitação de base e ímãs em seu quadro de referência. Através desses componentes magnéticos temos as não-linearidades no sistema. A magnitude e natureza da não-linearidade podem ser alteradas de acordo com a concepção dos ímãs do sistema. O uso de dois ímãs na base torna o sistema biestável. Quando essa base sofre excitação, a ponta do ímã oscila dentro do potencial do outro ímã fixo, fazendo com que a força de restituição se torne uma função não linear. Essa força de restituição não linear aumenta a geração de potência em relação a linear.

Figura 11 - Esquema de colheita de energia piezo-magneto-elástica



Fonte: Autor.

Não linearidades também aparecem nos sistemas piezoelétricos baseados em vibração de Pereira et. al (2019) e Al et. al (2019). Pereira et. al (2019) excita os sistemas com três tipos de vibração, harmônica, randômica e harmônica-randômica e verifica a potência gerada com os efeitos não lineares impostos no sistema. As não linearidades são inseridas na rigidez do material e no acoplamento piezoelétrico. A vibração harmônica representa ondas periódicas no tempo, a randômica representa excitar o sistema com períodos aleatórios e a harmônica-randômica hora é harmônica hora é randômica. Verificou-se que a melhor situação é a harmônica -randômica.

3. Considerações finais

Existe uma grande demanda por novas alternativas de captação de energia de maneira sustentável. Nesse sentido, o conceito de colheita de

energia passa a agregar valor na atual conjuntura, surgindo como uma alternativa para fornecimento de energia limpa e de fácil utilização.

O artigo aborda uma revisão bibliográfica do processo de colheita de energia vibracional a partir de materiais piezoelétricos como uma das mais promissoras colheitas para uso de forma direta e para pequenos circuitos, tipo baterias. Os materiais piezoelétricos, além de suportar uma grande quantidade de tensão mecânica, por serem materiais cerâmicos, possuem grande flexibilidade quanto à utilização, pois podem ser fabricados com diferentes propriedades. Foram apresentados alguns dos níveis de vibrações úteis que podem ser encontrados em quantidade significativa de aplicações. A interface eletrônica através dos circuitos e o aumento da energia gerada incluindo não linearidades no sistema mostraram significativa relevância no estudo da colheita de energia vibracional utilizando materiais piezoelétricos, segundo os exemplos e autores pesquisados citados. Nos casos apresentados, a eficiência foi aumentada depois de vários estudos sobre não linearidades, circuitos eletrônicos e formas de vibrações diferentes. Assim, o uso desse tipo de dispositivo em larga escala pode resultar em uma fonte de energia considerável.

Referências

AI, R. A.; MONTEIRO, L. L. S.; MONTEIRO JR, P. C. C.; PACHECO, P. M. C. L.; SAVI, M. A. Piezoelectric vibration-based energy harvesting enhancement exploiting nonsmoothness. **Actuators**, v. 8, n. 25, p. 1–15, mar. 2019.

CELLULAR, A. C. S. ; SILVA, Luciana L.; SAVI, M. A. Numerical investigation of nonlinear mechanical and constitutive effects on piezoelectric vibration-based energy harvesting. **tm-Technisches Messen**, v. 85, n. 9, p. 565–579, fev. 2018.

CELLULAR, ANA. **Análise da influência de efeitos não-lineares em sistemas de colheita de energia baseados em vibração utilizando materiais piezoelétricos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

CMMAD – COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO.
Nosso futuro comum. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1988.

DE MARQUI JR., C.; ERTURK, A. Airfoil-based linear and nonlinear electroaeroelastic energy harvesting. In: ELVIN, N.; ERTURK, A. (Eds.) **Advances in energy harvesting methods**, Springer, New York, 2013, Chapter 11, p. 269–294.

DE PAULA, A. S.; INMAN, D. J.; SAVI, M. A. Energy harvesting in a nonlinear piezomagnetoelastic beam subjected to random excitation. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 54, n. 55, p. 405–416, mar. 2015.

DIAS, J. A. C.; DE MARQUI JR., C.; ERTURK, A., Hybrid piezoelectric–inductive flow energy harvesting and dimensionless electroaeroelastic analysis for scalin, **Applied Physics Letters**, v. 102, n. 4, 044101 (5pp), jan. 2013.

ERTURK, A.; INMAN, D. J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations, **Smart Materials and Structures**, v. 18, n. 2, 025009, jan. 2009.

ERTURK, A.; INMAN, D. J. **Piezoelectric Energy Harvesting**. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK, 2011.

FEENSTRA, J., GRANSTROM, J. e SODANO, H.A. Energy harvesting through a backpack employing a mechanically amplified piezoelectric stack, **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 22, n. 3, p. 721–734, April 2008.

GAIOTTO, F. J. **Design de transformadores cerâmicos piezoelétricos e aplicações**. 2012. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade estadual de Maringá, Paraná, 2012.

GMBH & KG, C. **The world of nan positioning and micropositioning**. Physik Instrumente, 2006.

GONÇALVES, T. R. S. **Colheita Piezolétrica de Energia**. 2011. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) – Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, 2011.

HARB A. Energy harvesting: State-of-the-art. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 36, n. 10, p. 2641–2654, October 2011.

HOWELLS, C. A. Piezoelectric energy harvesting. **Energy Conversion and Management**, Power Technology Branch, USA, n. 50, p. 1847–1850, 2009.

INMAN, D. J.; E PRIYA, S, **Energy harvesting technologies**. Virginia Tech Center for Intelligent Material Systems and Structures, USA, 2009.

JORNET J. M.; AKYILDIZ I. F. Joint energy harvesting and communication analysis for perpetual wireless nanosensor networks in the terahertz band. **IEEE Transactions on Nanotechnology**, v. 11, n. 3, p. 570–580, may 2012.

KIM, H. S.; KIM, J. H.; KIM, J. Review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 12, n. 6, p. 1129–1141, December 2011.

MATEU, L. E; MOLL, F. Appropriate charge control of the storage capacitor in a piezoelectric energy harvesting device for discontinuous load operation. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 132, n. 1, p. 302–310, Nov. 2006.

PEREIRA, T. L.; De PAULA, A. S.; FABRO, A. T.; SAVI, M. A. Random effects in a nonlinear vibration-based piezoelectric energy harvesting system. **International Journal of Bifurcation and Chaos JCR**, v. 29, n. 4, 1950046, 2019.

PINNA, L.; DAHIYA, R. S.; NISI, F. D.; VALLE, M. Analysis of self-powered vibration-based energy scavenging system. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, Bari, 2010, p. 402–408, nov.2010

SCHWARTZ, M. M. **Encyclopedia of Smart Materials**. New York: Wiley J. and Sons, 2002.

SHEN. D.; PARK, J. H.; NOH, J. H.; CHOE, S. Y.; KIM, S. H.; WIKLE III, H. C.; KIM, D. J. Micromachined PZT cantilever based on SOI structure for low frequency vibration energy harvesting. **Sensors and Actuators A: Physical**, n. 154, p. 103–108, 2009.

SILVA, L. L.; MONTEIRO, P. C.; SAVI, M. A.; NETTO, T. A. On the nonlinear behavior of the piezoelectric coupling on vibration-based energy harvesters, **Shock and Vibration**, v. 2015, Article ID 73938, p. 1–15, 2015.

SILVA, L. L.; SAVI, M. A.; MONTEIRO JR, P. C. C; NETTO, T. A. Effect of the piezoelectric hysteretic behavior in the vibration-based energy harvesting, **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 24, n. 10, p. 1278–1285, jul. 2013.

STANTON, S. C.; ERTURK, A.; BRIAN P. MANN; DANIEL J. INMAN, Nonlinear piezoelectricity in electroelastic energy harvesters. Modeling and experimental identification, **Journal of Applied Physics**, v. 108, n. 7, 074903–9, nov. 2010.

TRIPLETT, A.; QUINN, D. D. The effect of non-linear piezoelectric coupling on vibration-based energy harvesting. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 20, n. 16, p. 1959–1967, nov. 2009.

WILLIAMS, C. B.; YATES, R. B. Analysis of a micro-electric generator for microsystems, **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 52, n. 1–3, p. 8–11, ISSN 0924–4247, Mar./Apr. 1996.

ZHU, M.; WORTHINGTON, M. Design and testing of piezoelectric energy harvesting devices for generation of higher electric power for wireless sensor networks. **IEEE, Sensors**, Christchurch,, p. 699–702, 2009.