

Avaliação do Provável Comportamento Caótico em Máquinas Vibracionais para Sistemas de Captação de Energia

Assessment of Probable Chaotic Behavior in Vibrational Machines for Energy Harvesting Systems

Kamily Fulber Basseio¹, Luiz Felipe Cassimano dos Santos², Luiza Morsche Romani³, Marlon Abati⁴, Vinícius Franzen Ramilo⁵, Douglas da Costa Ferreira⁶

RESUMO

Existem diversas fontes para realizar captação de energia elétrica, tais como a energia solar, do vento, da diferença de temperatura, de ondas de radiofrequência e da vibração. O estudo de sistemas de captação de energia não é algo novo. Especificamente dos sistemas vibratórios, existem estudos para melhoria de eficiência com indução à ressonância, sistemas multifrequência, materiais que aumentam a vibração, entre outros. Esse trabalho de pesquisa busca identificar um provável comportamento caótico na região limítrofe das frequências de ressonância em sistemas de captação de energia de vibração, para em estudos futuros, induzir esse comportamento com o objetivo do aumento da eficiência desses sistemas.

PALAVRAS-CHAVE: Captação de energia; Sistemas caóticos; Piezoelétrico; Máquinas vibratórias.

ABSTRACT

There are several sources for capturing electrical energy, such as solar energy, wind, temperature differences, radio frequency waves and vibration. The study of energy capture systems is not something new. Specifically regarding vibratory systems, there are studies to improve efficiency with resonance induction, multi-frequency systems, materials that increase vibration, among others. This research work seeks to identify a probable chaotic behavior in the border region of resonance frequencies in vibration energy capture systems, so that in future studies, this behavior can be induced with the aim of increasing the efficiency of these systems.

KEYWORDS: Energy capture; Chaotic systems; Piezoelectric; Vibrating machines.

INTRODUÇÃO

A captação de energia é caracterizada por pequenas fontes de energia que são convertidas em energia elétrica. Nesse campo de pesquisa é buscado meios de converter essas pequenas fontes e melhorar sua eficiência para que se tornem economicamente viáveis e um dia possam ser utilizadas como fontes eficientes e sustentáveis de energia elétrica (BLAKERS, 2015). O campo de estudo de sistemas de captação de energia é vasto, sendo que existem estudos de energia luminosa, que não utilizam apenas o sol, mas qualquer meio de emissão de fótons, até mesmo de insetos e plantas (MIRERSHADI; AHMADI-KANDJANI, 2015). Outro meio é o eólico, que não se baseia nas grandes massas

¹ Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: kamilyfulber@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 6777826032584670.

² Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: luizfelipesantos@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 4815144904369862.

³ Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: luizamorsche@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 7472482229039771.

⁴ Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: marlonabati@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 0455518685690851.

⁵ Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: viniusramilo@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 6102428625031381.

⁶ Docente no Curso de Engenharia Química/DAENG. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: douglasferreira@utfpr.edu.br. ID Lattes: 1684701123800326.

de ar que são utilizadas nas usinas eólicas tradicionais, mas qualquer forma de energia de massas de ar se movimentando (SIROHI; MAHADIK, 2011). Como pode ser observado nesses exemplos, o estudo da captação de energia estuda o aprimoramento e melhoria da eficiência de conversão de pequenas porções de energia em energia elétrica.

A captação de energia elétrica por meio de placas piezoelétricas tem se mostrado uma área de pesquisa em constante evolução, com diversas aplicações em máquinas e sistemas industriais que possuem movimento vibratório (ESALAT; SHOOSHTARI; KARAMI, 2022). Neste contexto, vê-se que o movimento vibratório está presente no cotidiano, de diferentes formas, até mesmo em eletrodomésticos como máquina de lavar são uma fonte de vibração com grande potencial para captação de energia elétrica (CHEN; WANG, 2017). Por mais que a energia com potencial de ser captada seja baixa, ela é suficiente para dispositivos que requerem pouca potência, como sensores, implantes médicos e dispositivos portáteis que são alimentados por baterias, pois, assim, não há necessidade de substituição regular dessas baterias (REZAEI et al., 2023). Também existem trabalhos de sistemas híbridos de captação de energia de vibração, solar e térmica (GAMBIER et al., 2012).

Ainda existe um enorme campo de estudo sobre o aumento de eficiência da captação de energia elétrica com uso de pastilhas piezoelétricas. Essa busca leva a estudos na melhoria dos materiais piezoelétricos (DRAGOMAN; ALDRIGO, 2016; LEFEUVRE et al., 2009), outros trabalhos buscam reduzir as perdas nos sistemas de transdução da energia mecânica em elétrica (BOUSSETTA et al., 2010), mas a maioria dos trabalhos de aumento de eficiência é concentrado no aproveitamento do efeito da ressonância, seja para dispositivos que permitem regulagem para ajustar as frequências de ressonância (CHALLA et al., 2008) outros que possuem diferentes frequências de ressonância (SECORD; MAZUMDAR; ASADA, 2010) e destaca-se o aumento da eficiência com uso de controladores (ÇIMEN, 2010; DI MONACO et al., 2013).

Sistemas dinâmicos não-lineares com pelo menos três dimensões de estado podem ser considerados caóticos se pequenas modificações nas condições iniciais resultarem em efeitos significativos no comportamento (KUMAR; GUPTA; ALI, 2019; TAN et al., 2021; TELLES RIBEIRO et al., 2022). Esses sistemas podem ser caracterizados pela presença de atratores estranhos (KUMAR; GUPTA; ALI, 2019) que foram inicialmente observados por Lorenz (DOROSHIN, 2011; SPROTT, 2014) e mensurados em um sistema dinâmico não linear por meio dos Expoentes de Lyapunov (DANCA; KUZNETSOV, 2018).

Apesar de Edward Norton Lorenz ser reconhecido pelos estudos do caos com a publicação do seu trabalho intitulado “Deterministic nonperiodic flow” de 1963, muito antes dele, em 1893, o estudioso Russo Aleksandr Mikhailovich Lyapunov publicou o trabalho “Sobre a forma de uma curva que satisfaz uma certa condição” e introduziu o conceito de estabilidade de sistemas por meio dos expoentes de Lyapunov, sendo que Lorentz estabeleceu o conceito de sistemas caóticos utilizando os expoentes de Lyapunov para determinar que um sistema dinâmico não-linear, com pelo menos três dimensões de estado, pode ser considerado caótico se os expoentes de Lyapunov forem positivos. A grande evolução dos estudos relacionais ao caos se deu após 1985, onde Alan Wolf estabeleceu um algoritmo para determinar os expoentes de Lyapunov em seu trabalho “Determining Lyapunov exponents from a time series”, que é a base do estudo de sistemas dinâmicos caóticos até os dias de hoje (FIEDLER-FERRARA; PRADO, 1994).

Com esse intuito, esse trabalho de pesquisa busca avaliar sistemas de captação de energia de vibração em energia elétrica. O foco do estudo é identificar o provável

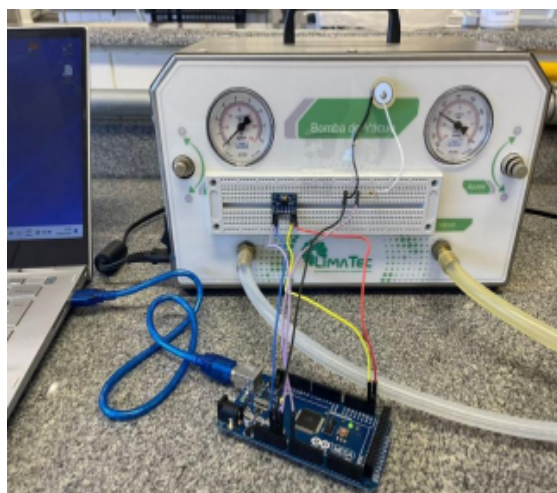
comportamento caótico dos sistemas vibratórios, para em estudos futuros determinar os expoentes de Lyapunov dos resultados do experimento e caracterizar o comportamento caótico. Depois disso, a continuação do trabalho será utilizar controladores matriciais lineares (Linear Matrix Inequalities - LMI) para manter o comportamento caótico ao longo do tempo de vibração. Nesse estudo preliminar, o objetivo é identificar o provável comportamento caótico que ocorre próximo às zonas de ressonância do sistema vibratório.

METODOLOGIA

O experimento foi conduzido com a utilização de placas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) de 20 mm de diâmetro com tensão máxima de 30 volts e terminações positivas e negativas. A medição das vibrações foi realizada por meio de um acelerômetro triaxial ADXL345 que possui acuracidade de $\pm 16g$ com resolução de 4 mg/LSB (LSB: Least Significant Bit – menor unidade de medida que pode ser lida pelo sensor) e capacidade de medição de inclinação de menos de 1° e com saída digital de 16 bits.

Para estabelecer a conexão entre os componentes, o pino de sinal da pastilha piezoelétrica foi conectado a um pino analógico do Arduino, enquanto o outro pino da pastilha foi aterrado (GND) do Arduino. Para proteger o pino analógico do Arduino e minimizar o ruído na leitura do sinal, um resistor de 10 kohms foi conectado em série com a pastilha piezoelétrica. O programa desenvolvido para o Arduino foi configurado para efetuar leituras a intervalos regulares de 0,001 segundos (1 milissegundo). A pastilha PZT e o acelerômetro foram instalados em uma bomba à vácuo, conforme mostra a figura 01. A bomba à vácuo é a fonte de vibração que irá excitar a pastilha piezoelétrica e o acelerômetro, dessa maneira, sendo a fonte de energia mecânica.

Figura 1 – Montagem da pastilha PZT e do acelerômetro na bomba à vácuo



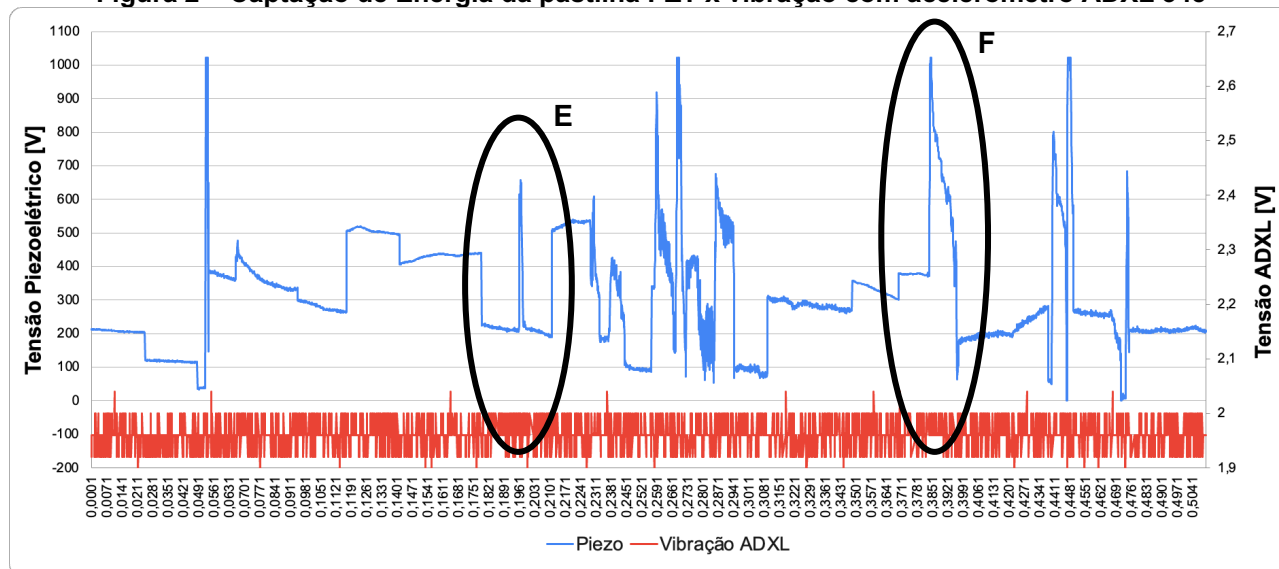
Fonte: Autoria própria (2023)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram coletadas 5103 amostras de dados de captação de energia em volts com a pastilha PZT e a mesma quantidade de dados de deslocamento com o acelerômetro ADXL

345. O gráfico com os resultados mostrados na figura 02 são do acelerômetro ADXL 345 e da pastilha PZT.

Figura 2 – Captação de Energia da pastilha PZT x vibração com acelerômetro ADXL 345



Fonte: Autoria própria (2023)

Os picos de vibração, podem indicar que a vibração do sistema entrou em ressonância com o conjunto no qual está acoplado o acelerômetro ADXL 345 e o protoboard no qual está fixado. No entanto, como mostra a figura 02, os picos de vibração não são coincidentes com os picos de captação de energia, como exemplificado pelos pontos E e F. Dessa maneira, uma possível explicação para esse fenômeno é a existência de comportamento caótico no sistema dinâmico estudado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi avaliar a relação entre a captação de energia de vibração com a vibração gerada por uma bomba à vácuo, de tal forma a caracterizar picos de captação de energia que não podem ser explicadas somente com a ressonância do sistema ou qualquer tipo de pico de vibração do sistema vibratório. Dessa maneira foi possível identificar um provável comportamento caótico do sistema. Para caracterizar o comportamento caótico será preciso determinar os expoentes de Lyapunov com os dados experimentais, o que será a continuação dessa pesquisa. Após essa confirmação, a próxima etapa da pesquisa será determinar um controlador utilizando o método de Desigualdades Matriciais Lineares (LMI – *Linear Matrix Inequalities*) de forma a maximizar a captação de energia.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por incentivar a pesquisa na graduação por meio do Programa de Iniciação Científica Voluntária (PIVIC). Agradecemos à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação do Campus de Francisco Beltrão

da UTFPR por disponibilizar os laboratórios de pesquisa e os instrumentos necessários para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BLAKERS, A. Sustainable Energy Options. v. 39, p. 559–589, 2015.

BOUSSETTA, H. et al. Efficient physical modeling of MEMS energy harvesting devices with VHDL-AMS. IEEE Sensors Journal, v. 10, n. 9, p. 1427–1437, 2010.

CHALLA, V. R. et al. A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tunability. Smart Materials and Structures, v. 17, n. 1, 1 fev. 2008.

CHEN, J.; WANG, Z. L. Reviving Vibration Energy Harvesting and Self-Powered Sensing by a Triboelectric Nanogenerator. JouleCell Press, , 15 nov. 2017.

ÇIMEN, T. Systematic and effective design of nonlinear feedback controllers via the statedependent Riccati equation (SDRE) method. Annual Reviews in Control. Anais...Elsevier Ltd, 2010.

DANCA, M. F.; KUZNETSOV, N. Matlab Code for Lyapunov Exponents of Fractional Order Systems. International Journal of Bifurcation and Chaos, v. 28, n. 5, 1 maio 2018.

DI MONACO, F. et al. Energy harvesting using semi-active control. Journal of Sound and Vibration, v. 332, n. 23, p. 6033–6043, 11 nov. 2013.

DOROSHIN, A. V. Modeling of chaotic motion of gyrostats in resistant environment on the base of dynamical systems with strange attractors. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, v. 16, n. 8, p. 3188–3202, ago. 2011.

DRAGOMAN, M.; ALDRIGO, M. Graphene rectenna for efficient energy harvesting at terahertz frequencies. Applied Physics Letters, v. 109, n. 11, 2016.

ESALAT, H.; SHOOSHTARI, A.; KARAMI, H. Analytical Modeling for Energy Harvesting of Lateral Vibrations of Rotating Machines Via Electromagnetic Mechanisms. Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Mechanical Engineering, 2022.

FIEDLER-FERRARA, N.; PRADO, C. P. C. DO. Caos: uma introdução. [s.l.] Editora Blucher, 1994.

GAMBIER, P. et al. Piezoelectric, solar and thermal energy harvesting for hybrid low-power generator systems with thin-film batteries. Measurement Science and Technology, v. 23, n. 1, 2012.

GUO, R. A simple adaptive controller for chaos and hyperchaos synchronization. Physics

Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics, v. 372, n. 34, p. 5593–5597, 18 ago. 2008.

KUMAR, R.; GUPTA, S.; ALI, S. F. Energy harvesting from chaos in base excited double pendulum. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 124, p. 49–64, 1 jun. 2019.

LEFEUVRE, E. et al. Materials, structures and power interfaces for efficient piezoelectric energy harvesting. *Journal of Electroceramics*, v. 22, n. 1–3, p. 171–179, fev. 2009.

MIRERSHADI, S.; AHMADI-KANDJANI, S. Efficient thin luminescent solar concentrator based on organometal halide perovskite. *Dyes and Pigments*, v. 120, p. 15–21, 2015.

REZAEI, M. et al. Integrating PZT layer with tuned mass damper for simultaneous vibration suppression and energy harvesting considering exciter dynamics: An analytical and experimental study. *Journal of Sound and Vibration*, v. 546, 3 mar. 2023.

SECORD, T. W.; MAZUMDAR, A.; ASADA, H. H. A multi-cell piezoelectric device for tunable resonance actuation and energy harvesting. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 2169–2176, 2010.

SIROHI, J.; MAHADIK, R. Piezoelectric wind energy harvester for low-power sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 22, n. 18, p. 2215–2228, dez. 2011.

SPROTT, J. C. A dynamical system with a strange attractor and invariant tori. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, v. 378, n. 20, p. 1361–1363, 4abr. 2014.

TAN, T. et al. Piezoelectric autoparametric vibration energy harvesting with chaos control feature. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 161, 1 dez. 2021.

TELLES RIBEIRO, J. G. et al. Controlling chaos for energy harvesting via digital extended time-delay feedback. *European Physical Journal: Special Topics*, v. 231, n. 8, p. 1485–1490, 1 jul. 2022.