AVALIAÇÃO DO PROVÁVEL COMPORTAMENTO CAÓTICO EM MÁQUINAS VIBRACIONAIS PARA SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA

Kamily Fulber BASSEIO[1], Luiz Felipe Cassimano dos SANTOS[1], Luiza Morsche ROMANI[1], Marlon ABATI[1], Vinícius Franzen RAMILO[1], Douglas da Costa FERREIRA[1]

[1]Departamento Acadêmico de Engenharias
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Francisco Beltrão
Francisco Beltrão – Paraná - Brasil

E-mails: kamilyfulber@alunos.utfpr.edu.br, luizfelipesantos@alunos.utfpr.edu.br, luizamorsche@alunos.utfpr.edu.br, marlonabati@alunos.utfpr.edu.br, viniciusramilo@alunos.utfpr.edu.br, douglasferreira@utfpr.edu.br

Resumo: *Existem diversas fontes para realizar captação de energia elétrica, tais como a energia solar, do vento, da diferença de temperatura, de ondas de rádio frequência 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.*

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 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 (BLAKERS, 2015).

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). O efeito piezoelétrico foi primeiramente citado pelos irmãos Curie e Curie (1881), através de um experimento mostrando que alguns cristais quando submetidos a tensão mecânica conduzem eletricidade (ODETOYAN; EDE, 2021). Dentre as possíveis fontes de vibração, incluem-se motores, turbinas, pontes e até mesmo o tráfego de veículos.

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). Os instrumentos para realizar a transdução de vibração em energia elétrica podem ser sistemas piezoelétricos, eletromagnéticos ou híbridos, ou seja, que captam energia da vibração e de outras fontes junto com a vibração, buscando aumentar a eficiência global do sistema. Entre os diversos trabalhos sobre sistemas híbridos existem aqueles relacionando a vibração e o efeito eletromagnético do corpo se movimentando pelo efeito da vibração (IQBAL; KHAN, 2018; OWENS; MANN, 2012; WANG et al., 2007). 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).

Especificamente sobre controladores envolvendo sistemas de captação de energia, existem muitos trabalhos que estudam o comportamento caótico (CHAVARETTE, 2012, 2013), no entanto, esses trabalhos se concentram na redução ou eliminação do comportamento caótico (GUO, 2008; TUSSET; BALTHAZAR; FELIX, 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

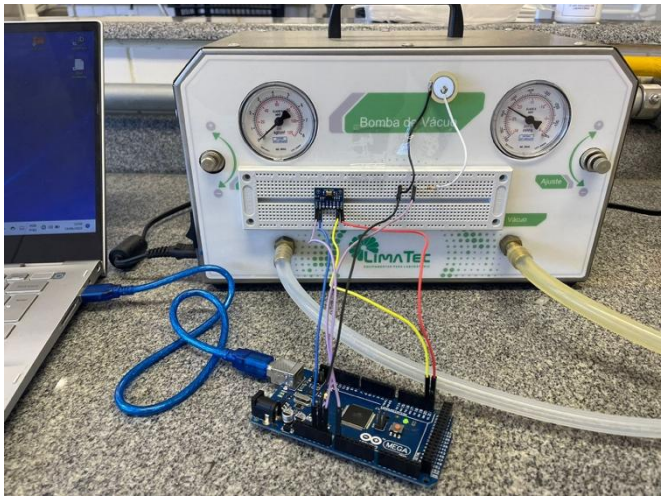
O experimento foi conduzido com a utilização de placas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) de 20 mm de diâmetro com tensão máxima de 30 volts e terminações positivas e negativas. A medição das vibrações foi realizada por meio de um acelerômetro triaxial ADXL 345 que possui acuracidade de $\pm$16g com 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 1º e com saída digital de 16 bits, conforme figura 01.

Figura 1 – Pastilha piezoelétrica PZT de 20 mm e acelerômetro ADXL 345 utilizados no experimento

Fonte: Autoria própria (2023)

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) no 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 03. 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 3 – Montagem da pastilha PZT e do acelerômetro na bomba à vácuo

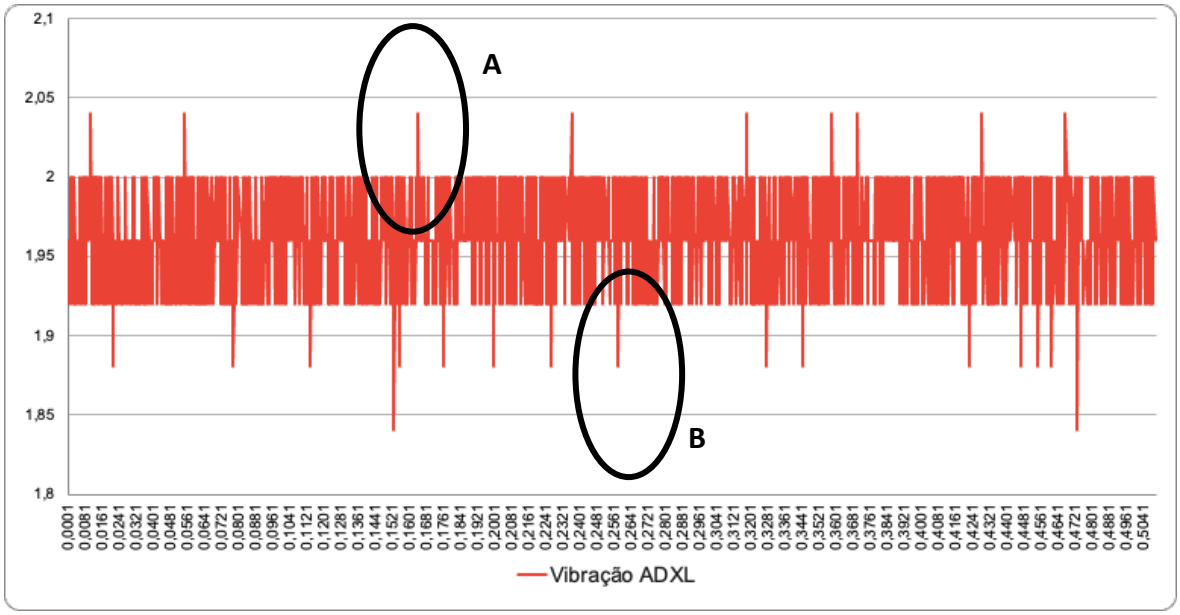


Fonte: Autoria própria (2023)

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 04 são do acelerômetro ADXL 345. Os picos de vibração, onde estão indicados, como exemplo, as áreas A e B, 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.

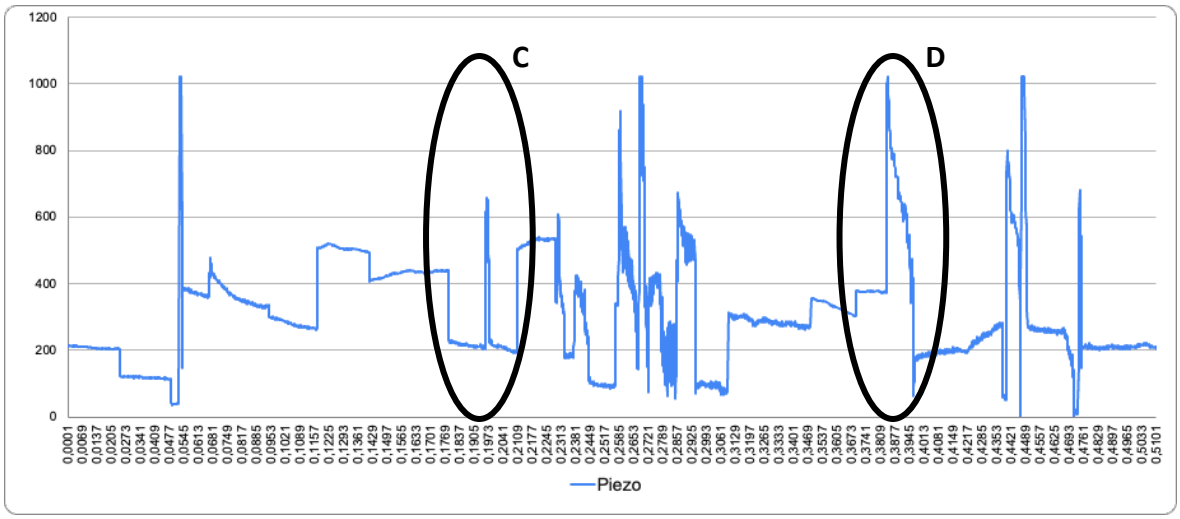
Figura 4 –Vibração com acelerômetro ADXL 345 e os picos de vibração



Fonte: Autoria própria (2023)

Ao analisar o gráfico da captação de energia com a pastilha PZT tem-se o gráfico mostrado na figura 05. Neste gráfico é possível observar os picos de captação de energia, como exemplificado pelas áreas C e D.

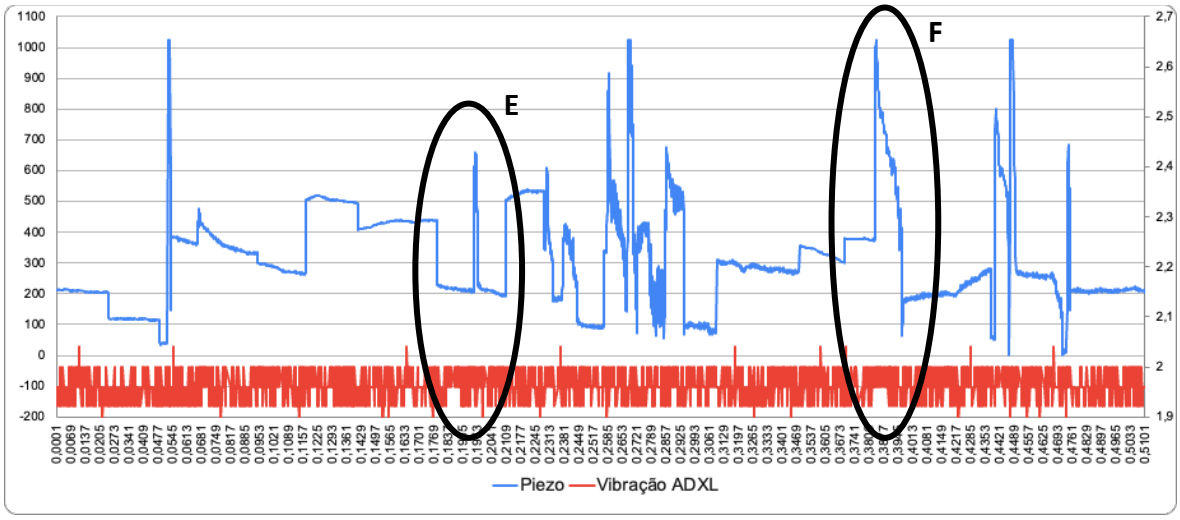
Figura 5 –Vibração com acelerômetro ADXL 345 e os picos de vibração



Fonte: Autoria própria (2023)

No entanto, como mostra a figura 06, 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.

Figura 6 – Captação de Energia da pastilha PZT x vibração com acelerômetro ADXL 345



Fonte: Autoria própria (2023)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi avaliar a captação de energia de vibração com pastilhas piezoelétricas e relacionar a energia captada com a vibração gerada, de tal forma a caracterizar picos de captação de energia que não podem ser explicadas somente com a ressonância do sistema.

A continuação dessa pesquisa é caracterizar a dinâmica do sistema com os expoentes de Lyapunov, de tal maneira a mensurar o seu comportamento dinâmico. Em um momento posterior, irá se buscar controlar o comportamento do sistema pelo 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.

CHAVARETTE, F. R. *On an optimal linear control of a chaotic non-ideal duffing system*. Applied *Mechanics and Materials. Anais*...Trans Tech Publications Ltd, 2012.

CHAVARETTE, F. R. Control design applied to a non-ideal structural system with behavior chaotic. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, v. 86, n. 3, p. 487–500, 2013.

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 state-dependent 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.

IQBAL, M.; KHAN, F. U. Hybrid vibration and wind energy harvesting using combined piezoelectric and electromagnetic conversion for bridge health monitoring applications. *Energy Conversion and Management*, v. 172, p. 611–618, 15 set. 2018.

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.

ODETOYAN, A. O.; EDE, A. N. Energy Harvesting from Vibration of Structures-A Brief Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 1107, n. 1, p. 012192, 1 abr. 2021.

OWENS, B. A. M.; MANN, B. P. Linear and nonlinear electromagnetic coupling models in vibration-based energy harvesting. *Journal of Sound and Vibration*, v. 331, n. 4, p. 922–937, 13 fev. 2012.

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, 4 abr. 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.

TUSSET, A. M.; BALTHAZAR, J. M.; FELIX, J. L. P. On elimination of chaotic behavior in a non-ideal portal frame structural system, using both passive and active controls. *JVC/Journal of Vibration and Control*, v. 19, n. 6, p. 803–813, abr. 2013.

WANG, P. H. et al. Design, fabrication and performance of a new vibration-based electromagnetic micro power generator. *Microelectronics Journal*, v. 38, n. 12, p. 1175–1180, dez. 2007.