



## Captação de energia de vibração caracterizando um provável comportamento caótico: estudo de caso em eletrodomésticos

### Vibration energy harvesting characterizing a probable chaotic behavior: case study in household appliances

Vinícius Franzen Ramilo<sup>1</sup>, Luiza Morsche Romani<sup>2</sup>, Kamily Fulber Basseio<sup>3</sup>, Marlon Abati<sup>4</sup>, Luiz Felipe Cassimano dos Santos<sup>5</sup>, Douglas da Costa Ferreira<sup>6</sup>

#### RESUMO

A energia de vibração é uma fonte potencial de energia que pode ser convertida em energia elétrica de forma sustentável, sendo aproveitada a partir de diversos fenômenos naturais ou artificiais. No entanto, os sistemas de captação de energia de vibração apresentam desafios para alcançar uma eficiência satisfatória, especialmente na região de ressonância, onde o comportamento dinâmico pode se tornar caótico. Neste trabalho, propõe-se investigar experimentalmente um possível comportamento caótico de um sistema de captação de energia de vibração, composto de pastilhas piezoelétricas acopladas a um eletrodoméstico. O objetivo é caracterizar as condições que possam levar à ocorrência do caos e avaliar sua influência na energia gerada pelo sistema. Foi possível avaliar que picos de captação de energia não coincidem com picos de vibração do sistema, caracterizando um provável comportamento caótico do sistema. Os resultados obtidos poderão contribuir para o desenvolvimento de estratégias de controle e otimização da eficiência dos sistemas de captação de energia de vibração.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistema de Captação de Energia; Vibração; Comportamento caótico.

#### ABSTRACT

Vibration energy is a potential source of energy that can be converted into electrical energy in a sustainable way, being used from various natural or artificial phenomena. However, vibration energy harvesting systems present challenges in achieving satisfactory efficiency, especially in the resonance region, where dynamic behavior can become chaotic. In this work, we propose to experimentally investigate a possible chaotic behavior of a vibration energy harvesting system, composed of piezoelectric pads coupled to a household appliance. The objective is to characterize the conditions that may lead to the occurrence of chaos and evaluate their influence on the energy generated by the system. It was possible to assess that energy capture peaks do not coincide with system vibration peaks, characterizing a probable chaotic behavior of the system. The results obtained may contribute to the development of control strategies and optimization of the efficiency of vibration energy harvesting systems.

**KEYWORDS:** Energy Harvesting System; Vibration; Chaotic behavior.

<sup>1</sup> Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: [viniciusramilo@alunos.utfpr.edu.br](mailto:viniciusramilo@alunos.utfpr.edu.br). ID Lattes: 6777826032584670.

<sup>2</sup> Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: [luizamorsche@alunos.utfpr.edu.br](mailto:luizamorsche@alunos.utfpr.edu.br). ID Lattes: 4815144904369862.

<sup>3</sup> Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: [kamilyfulber@alunos.utfpr.edu.br](mailto:kamilyfulber@alunos.utfpr.edu.br). ID Lattes: 7472482229039771.

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

<sup>5</sup> Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: [luizfelipesantos@alunos.utfpr.edu.br](mailto:luizfelipesantos@alunos.utfpr.edu.br). ID Lattes: 6102428625031381.

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



## INTRODUÇÃO

No contexto de busca por fontes de energia renováveis, a energia de vibração proveniente da piezoelectricidade pode ser aproveitada para a geração de energia elétrica. As pastilhas piezoelétricas são capazes de converter energia mecânica em eletricidade, sendo uma alternativa para a geração de energia renovável (PRADEESH et al., 2020). Pastilhas piezoelétricas são dispositivos que captam energia de vibração e podem ser aplicados em vários contextos observados no cotidiano, tais como o movimento humano e o fluxo de ar (WEI; JING, 2017). O aumento exponencial da demanda energética global gera uma busca acelerada por fontes de energia limpas e renováveis em face à preocupação com o efeito estufa, oriundo da emissão de gases que contribuem com o agravamento deste problema (GURUACHARYA; HOSSAIN, 2018).

A sustentabilidade proporcionada por sistemas de captação de energia de vibração tem como ponto negativo a baixa eficiência. Este trabalho busca avaliar um possível aumento na eficiência de um sistema de captação de energia de vibração a partir da análise do comportamento caótico do sistema, diferenciando-se de vários estudos existentes. Estudos que buscam obter a máxima captação de energia a partir do caos em sistemas vibratórios já existem (HENRIQUE; COSTA; SILVA, 2013), contudo, o foco no controle do caos é predominante nestes trabalhos (KUMAR; GUPTA; ALI, 2019; TAN et al., 2021; TELLES RIBEIRO et al., 2022). O estudo proposto visa aumentar a conversão de energia mecânica em energia elétrica por meio da energia presente no caos, diferente dos estudos existentes que objetivam o controle do caos.

Pequenas alterações nas condições iniciais resultam em efeitos significativos do comportamento dos sistemas caóticos (KUMAR; GUPTA; ALI, 2019; TAN et al., 2021; TELLES RIBEIRO et al., 2022). Os sistemas caóticos são não-lineares e podem ser caracterizados pela presença de atratores estranhos (KUMAR; GUPTA; ALI, 2019) que foram inicialmente observados por Lorenz e mensurados em um sistema dinâmico não-linear por meio dos Expoentes de Lyapunov (DANCA; KUZNETSOV, 2018).

Em 1893, o matemático e físico Aleksandr Mikhailovich Lyapunov introduziu o conceito de estabilidade de sistemas dinâmicos não-lineares a partir dos expoentes de Lyapunov com seu trabalho "*On the form of a curve that satisfies a certain condition*". Este estudo serviu como base para Edward Norton Lorenz que, em 1963, utilizou os expoentes de Lyapunov para estabelecer o conceito de sistemas caóticos. Com isso, ele determinou em seu trabalho chamado "*Deterministic nonperiodic flow*" que se os expoentes de Lyapunov forem positivos, define-se um sistema caótico, válido para sistemas dinâmicos não-lineares com, pelo menos, três dimensões de estado. O conceito de caos definido por Lorenz é popularmente conhecido como "Efeito Borboleta". Apesar da existência destes estudos referentes ao caos, um algoritmo capaz de determinar os expoentes de Lyapunov surgiu apenas em 1985, desenvolvido pelo estudioso Alan Wolf em seu trabalho "*Determining Lyapunov exponents from a time series*", sendo uma base essencial para o estudo de sistemas dinâmicos caóticos até os dias atuais (FIEDLER-FERRARA; PRADO, 1994).

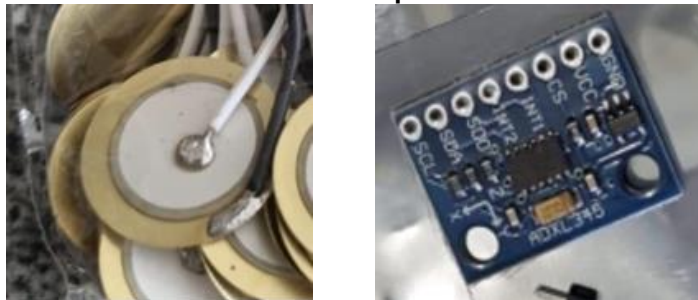
O presente trabalho objetiva estudar o comportamento de um sistema que capta energia de vibração em relação à geração de vibração no sistema dinâmico, buscando a possível existência de um comportamento caótico nesse sistema, mediante a verificação de coincidência entre os picos de energia captada e os picos de vibração, em que o

comportamento caótico corresponde ao fato de que as condições iniciais não explicam o comportamento dinâmico desse sistema.

## METODOLOGIA

O experimento foi conduzido com a utilização de pastilhas piezoelétricas de 20 mm de diâmetro com tensão máxima de 30 V. A medição das vibrações foi realizada por meio de um acelerômetro triaxial ADXL 345 que possui acuracidade de 16g e medição de inclinação de menos de 1°, conforme mostra a Figura 1.

**Figura 1 – Pastilha piezoelétrica de 20 mm com terminações soldadas e acelerômetro ADXL 345, utilizados no experimento**



Fonte: Autoria própria (2023)

Foi utilizado um Arduino Mega 2560 com clock de 16 MHz, Regulador de 5V, regulador de 3,3V (150 mA), 4 portas seriais de hardware, 16 portas analógicas do conversor ADC (A0 até A15) e 12 portas PWM de 16 bits (D2 a D13). Para fazer a conexão entre os sensores e o Arduino foi utilizado um protoboard de 840 pinos e fios jumper que evitam a necessidade de soldagem. Para reduzir o ruído na leitura do sinal e proteger o pino analógico do Arduino, 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 milésimo de segundo).

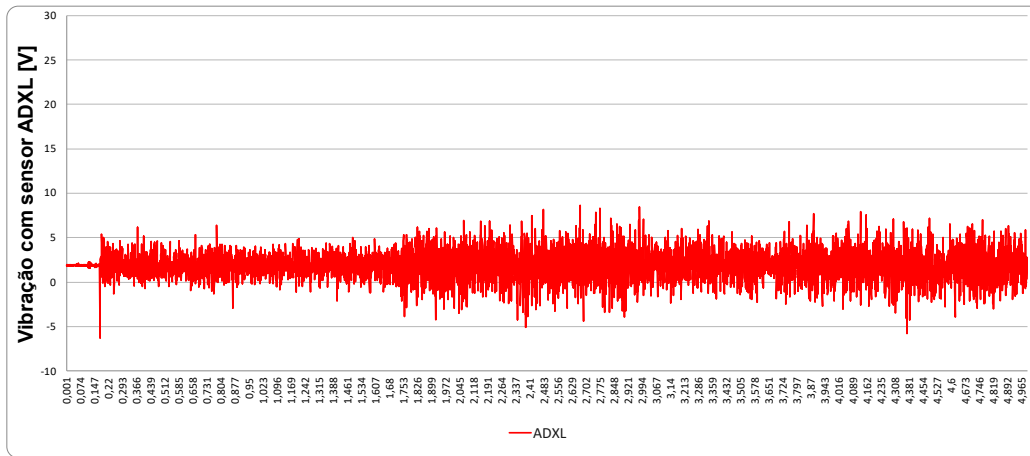
O aparato foi montado em um liquidificador residencial para avaliar a vibração gerada com o acelerômetro, a energia captada com as pastilhas piezoelétricas e identificar um possível efeito caótico em picos de energia.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram selecionadas intencionalmente 5000 amostras de dados, para que fosse possível observar o fenômeno a que se propõem esse estudo. Importante registrar que o fenômeno ocorreu em diversas faixas de dados, mas foram intencionalmente selecionadas amostras onde o fenômeno ficou mais evidente.

O gráfico com os resultados mostrados na Figura 2 são do acelerômetro ADXL 345. Os diversos picos de vibração indicam frequências ressonantes em diversas faixas de vibração do sistema.

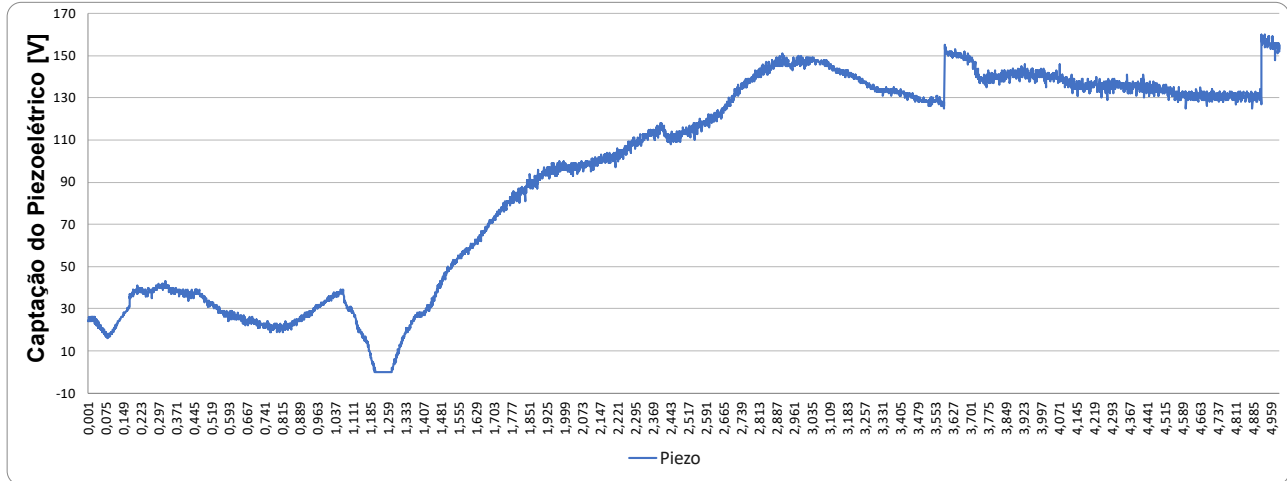
Figura 2 –Vibração com acelerômetro ADXL 345 e os picos de vibração



Fonte: Autoria própria (2023)

O gráfico da Figura 3 mostra a captação de energia com a pastilha piezoelétrica para as mesmas amostras de dados intencionalmente selecionadas. A potência do liquidificador foi aumentada ao longo do experimento, por isso a captação de energia aumenta ao longo da faixa de análise.

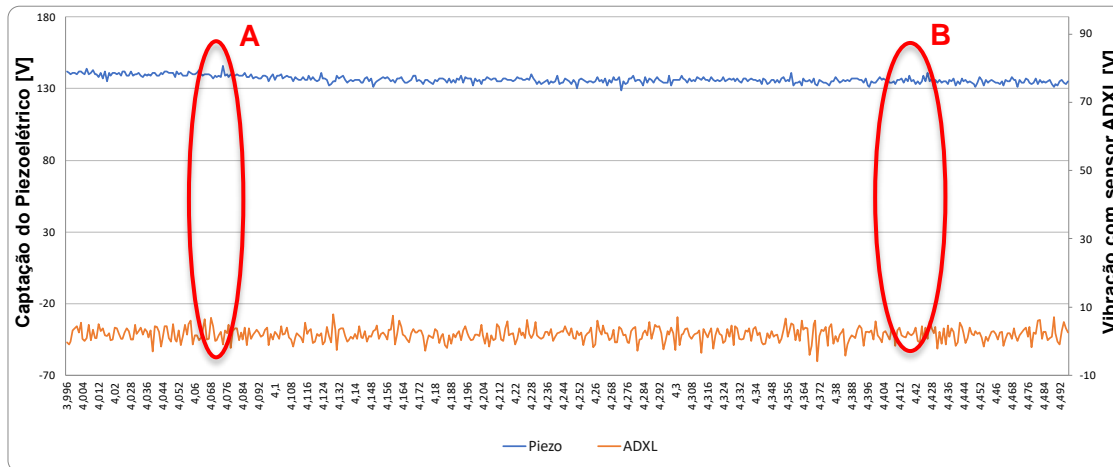
Figura 3 – Captação de energia com pastilhas piezoelétricas



Fonte: Autoria própria (2023)

Foram selecionadas amostras entre a coleta 4000 e 4500, para observar um possível comportamento caótico, conforme mostra a Figura 4. Os pontos A e B destacados na figura mostram picos de captação de energia que não condizem com picos de vibração do sistema.

Figura 4 – Captação de Energia da pastilha PZT x vibração com acelerômetro ADXL 345



Fonte: Autoria própria (2023)

A não coincidência entre os picos de captação de energia e os picos de vibração do sistema evidencia a existência de picos de captação de energia que não podem ser explicados somente pela vibração do sistema. A partir desta observação, pode-se definir um provável comportamento caótico do sistema, passível de ser futuramente estudado com foco na maximização da captação de energia de vibração.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme mostra o capítulo anterior, é possível afirmar que existe um provável comportamento caótico do sistema, porque os picos de captação de energia não podem ser justificados pela ressonância do sistema ou mesmo por picos de vibração do sistema excitado. Como o objetivo deste trabalho foi avaliar a relação entre a vibração de um eletrodoméstico medindo essa vibração com um acelerômetro e relacionar os picos de vibração com a captação de energia por meio de pastilhas piezoelétricas, de tal forma a caracterizar picos de captação de energia que não podem ser explicadas somente pelos picos de vibração ou pela ressonância do sistema vibratório, caracterizando um possível comportamento caótico, conclui-se que o objetivo foi atingido. A continuidade dessa pesquisa é comprovar o comportamento caótico; dessa maneira será preciso determinar os expoentes de Lyapunov com os dados experimentais coletados, o que será realizado com a inserção dos dados das coletas no Matlab e utilizado um algoritmo de análise já de conhecimento do orientador da pesquisa. Após essa confirmação, a próxima etapa da pesquisa será projetar um controlador utilizando o método de Desigualdades Matriciais Lineares (LMI – *Linear Matrix Inequalities*) de forma a maximizar a captação de energia do sistema e poder propor uma patente desse sistema controlado.

## CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.





## 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

ABDELKAREEM, M. A. A. et al. Energy harvesting sensitivity analysis and assessment of the potential power and full car dynamics for different road modes. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 110, p. 307–332, 15 set. 2018.

ALI, A. et al. Design of novel energy-harvesting regenerative shock absorber using barrel cam follower mechanism to power the auxiliaries of a driverless electric bus. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 48, 1 dez. 2021.

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.

DUONG, M. T.; CHUN, Y. DO. Optimal Design of a Novel Exterior Permanent Magnet Tubular Machine for Energy Harvesting from Vehicle Suspension System. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 35, n. 4, p. 1772–1780, 1 dez. 2020.

GURUACHARYA, S.; HOSSAIN, E. Self-Sustainability of Energy Harvesting Systems: Concept, Analysis, and Design. **IEEE Transactions on Green Communications and Networking**, v. 2, n. 1, p. 175–192, 1 mar. 2018.

HENRIQUE, C.; COSTA, C.; SILVA, S. Exploiting Nonlinearities and Chaos To Enhance Energy Harvesting System Using Piezoelectric Devices. **22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)**, v. 1, n. Cobem, p. 449–457, 2013.

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.

PRADEESH, E. L. et al. **Vibration Based Piezoelectric Energy Harvesting-A Review**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **Anais...**IOP Publishing Ltd, 14 dez. 2020.

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.

WEI, C.; JING, X. **A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 2017.