

Comportamento caótico potencial em sistemas de captação de energia de vibração: estudo de caso em movimento humano

Potential chaotic behavior in vibration energy harvesting systems: case study in human motion

Luiza Morsche Romani¹, Luiz Felipe Cassimano dos Santos², Kamily Fulber Basseio³, Marlon Abati⁴, Vinícius Franzen Ramilo⁵, Douglas da Costa Ferreira⁶

RESUMO

A rápida evolução na captação de energia de vibração tem aberto novas possibilidades para fontes alternativas de energia em diversas aplicações. Este estudo investiga a viabilidade de captar energia elétrica a partir das vibrações geradas pelo ato de caminhar. A pesquisa se concentra no uso de placas piezoelétricas, que são materiais que produzem carga elétrica quando submetidos a estresse mecânico, neste caso, o ato de caminhar. A energia gerada pelas placas piezoelétricas foi coletada e analisada por um Arduino para estudar a correlação entre a vibração e a energia produzida. Os resultados do experimento indicam que os picos de vibração não correspondem aos maiores valores de energia captada. Em vez disso, a maior captação de energia ocorre em torno dos picos de vibração, uma área que pode ser caracterizada como caótica.

PALAVRAS-CHAVE: Captação de Energia; Vibração; Região Caótica

ABSTRACT

The rapid evolution in vibration energy harvesting has opened new possibilities for alternative energy sources in various applications. This study investigates the feasibility of harvesting electrical energy from vibrations generated by the act of walking. The research focuses on the use of piezoelectric plates, which are materials that produce an electrical charge when subjected to mechanical stress, in this case, the act of walking. The energy generated by the piezoelectric plates was collected and analyzed by an Arduino to study the correlation between vibration and the energy produced. The results of the experiment indicate that the vibration peaks do not correspond to the highest values of energy harvested. Instead, the greatest energy harvested occurs around vibration peaks, an area that can be characterized as chaotic.

KEYWORDS: Energy Harvesting; Vibration; Chaotic Region

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos vem aumentando o interesse em descobrir como obter energia de fontes renováveis e de baixo custo. A técnica conhecida como piezoeletricidade é a base para a produção de eletricidade a partir da energia mecânica, e tem se tornado cada vez

¹ Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: luizamorsche@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: kamilyfulber@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.



mais utilizada para a geração de corrente elétrica limpa, barata e renovável (LIANG; LIAO, 2011).

Esta energia é gerada por meio da ação de mecanismos de conversão de energia, que transformam a energia cinética em energia elétrica, a qual pode ser armazenada em baterias e usada para alimentar dispositivos, como celulares, computadores, relógios e lâmpadas. O uso desta técnica tem se mostrado viável para a captação de energia elétrica por meio da vibração humana, com resultados satisfatórios em termos de desempenho (HOWELLS, 2009).

Sistemas de captação de energia transformam pequenas fontes de energia em energia elétrica e têm sido largamente estudados nos últimos 20 anos (SAFAEI; SODANO; ANTON, 2019). Muitas são as fontes de energia que podem ser convertidas em elétrica em sistemas de captação de energia elétrica, tais como pequenos gradientes de temperatura, luminosidade de reações químicas, ondas de radiofrequência e vibração (ABDELKEFI, 2016). Dentre muitos trabalhos publicados, esse artigo irá se concentrar nos sistemas de captação de energia de vibração. A vibração de ondas do mar e do movimento do corpo humano, por exemplo, podem produzir energia suficiente para serem transformadas em fonte de energia elétrica, onde suas aplicações mais comuns são em sensores remotos e pequenos componentes eletrônicos de baixo consumo de energia (WEI; JING, 2017).

Os trabalhos sobre sistemas de captação de energia de vibração são os mais variados. Existem trabalhos que se concentram em melhorar a eficiência por meio do efeito da ressonância, como realizar projetos de elementos multimodais (LIU; QIAN; LEE, 2013) onde existe ressonância em diversos espectros de vibração, ou estudos estatísticos para projetar o sistema de forma que fique a maior parte do tempo em ressonância. Também existem diversos trabalhos com sistemas híbridos, ou seja, que captam energia da vibração e de outras fontes ao mesmo tempo, de forma a aumentar a eficiência do sistema como um todo. Dos sistemas híbridos existem trabalhos unindo a vibração e o efeito eletromagnético do corpo se movimentando pelo efeito da vibração (IQBAL; KHAN, 2018; OWENS; MANN, 2012). Também existem trabalhos de sistemas híbridos de captação de energia de vibração, solar e térmica (GAMBIER et al., 2012).

Aumentar a eficiência de sistemas de captação de energia é o principal desafio de qualquer pesquisa sobre o tema. Como já exposto anteriormente, são muitos os trabalhos nesse sentido. Dentre tantos estudos na melhoria da eficiência dos sistemas de captação de energia, o foco dessa pesquisa é estudar o comportamento caótico da vibração e modificar o comportamento do sistema de captação para que utilize o potencial do caos para ganho de eficiência.

Já existem estudos buscando maximizar a captação de energia utilizando o comportamento caótico de sistemas vibratórios (HENRIQUE; COSTA; SILVA, 2013), no entanto, a maior parte dos trabalhos envolvendo sistemas piezoelétricos vibratórios e caos estão concentrados no controle do caos (KUMAR; GUPTA; ALI, 2019; TAN et al., 2021; TELLES RIBEIRO et al., 2022), sendo que o estudo proposto não é controlar o caos, mas sim fazer uso da energia disponível no caos.

Um sistema dinâmico pode ser considerado caótico 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). 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 (DOROSHIN, 2011;

SPROTT, 2014) e mensurados em um sistema dinâmico não-linear por meio dos Expoentes de Lyapunov (DANCA; KUZNETSOV, 2018).

Em 1893 Lyapunov introduziu o conceito de estabilidade de sistemas por meio dos expoentes de Lyapunov, mas somente em 1930 Lorentz estabeleceu o conceito de sistemas caóticos, onde utilizou 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. Apenas em 1985 Wolf estabeleceu um algoritmo para determinar os expoentes de Lyapunov, que é a base do estudo de sistemas dinâmicos caóticos até os dias de hoje (FIEDLER-FERRARA; PRADO, 1994).

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de um sistema de captação de energia de vibração em relação à vibração induzida no sistema dinâmico, de tal maneira a verificar se os picos de energia captada coincidem com os picos de vibração e, dessa maneira, buscar a identificação de um possível comportamento caótico desse sistema, ou seja, onde as condições iniciais não podem explicar o comportamento dinâmico desse sistema.

METODOLOGIA

O experimento foi montado utilizando pastilhas piezoelétricas de latão de 20 mm, com uma tensão máxima especificada de 30 V para coleta de dados de captura de energia e acelerômetro triaxial ADXL 345, que tem uma precisão de $\pm 16g$ com uma resolução de 4 mg/LSB⁷ e a capacidade de medir inclinações de menos de 1° com uma saída digital de 16 bits, foi utilizado para medir as vibrações, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Pastilha piezoelétrica de 20 mm utilizada no experimento



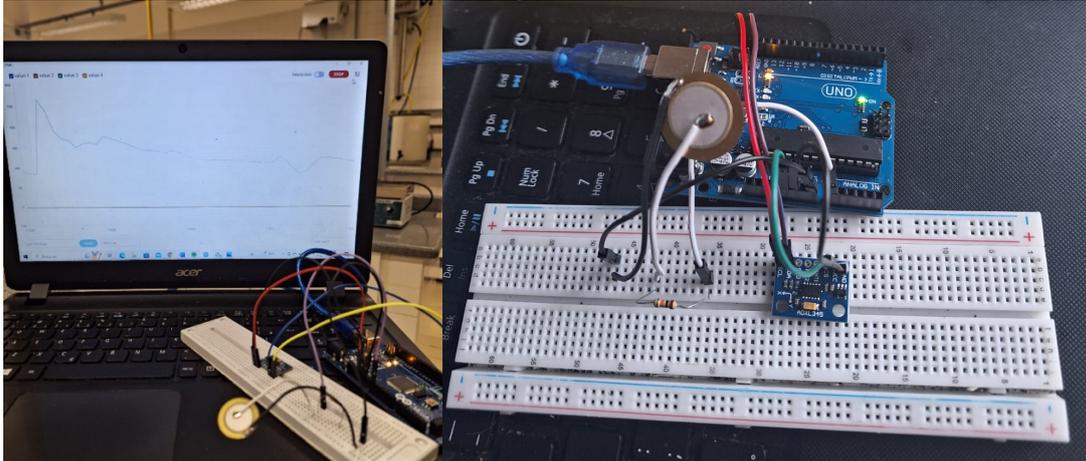
Fonte: Autoria própria (2023)

No experimento, as pastilhas piezoelétricas foram acopladas à uma placa Arduino. O cabo preto de cada pastilha foi conectado ao terminal GND do Arduino, assim como o terminal GND do acelerômetro. O cabo branco das pastilhas foi ligado a um resistor de 10k Ω , que por sua vez foi conectado ao terminal A0 do Arduino. O Arduino foi então conectado a um notebook e o código específico foi executado. Os dados de vibração da pastilha piezoelétrica e os dados do sensor foram coletados através do monitor serial da IDE do Arduino. Durante a realização do experimento, um indivíduo carregou o conjunto montado e caminhou por um período de 20 segundos, mantendo, dentro do possível,

⁷ LSB: *Least Significant Bit* - a menor unidade de medida que pode ser lida pelo sensor

constantes a velocidade de caminhada e o comprimento do passo em 41 centímetros. Para medir o comprimento do passo, utilizou-se uma escala fixada no chão enquanto o indivíduo carregava o conjunto ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Arranjo da pastilha piezoelétrica no protoboard e com Arduino utilizado no experimento

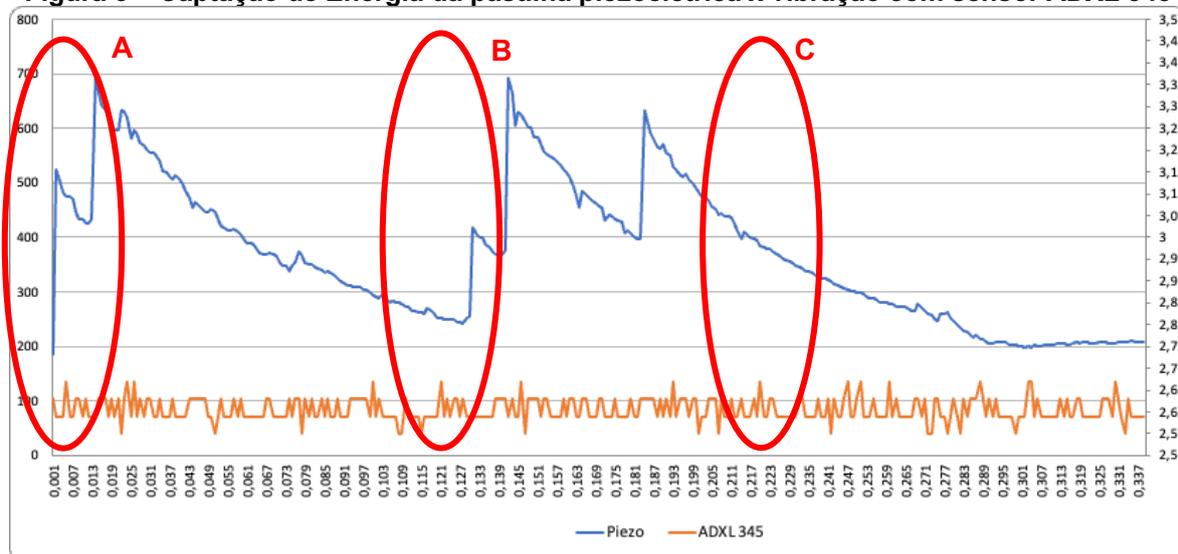


Fonte: Autoria própria (2023)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O gráfico de vibração em função do tempo do sensor acelerômetro ADXL 345 foi gerado utilizando o serial plotter da IDE.

Figura 3 – Captação de Energia da pastilha piezoelétrica x vibração com sensor ADXL 345



Fonte: Autoria própria (2023)

O Arduino coletou as medições das correntes elétricas e a vibração durante a caminhada, permitindo assim estabelecer a correlação entre a vibração e a energia elétrica captada. O sensor empregado no experimento é um sensor tridimensional (X, Y e Z), portanto, as leituras foram realizadas independentemente em cada um dos três eixos. Como o objetivo da análise é a magnitude da vibração, independentemente de sua direção, os dados de apenas um dos eixos (selecionado aleatoriamente) foram utilizados para a



análise combinada do sensor acelerômetro e da pastilha piezoelétrica. A Figura 3 apresenta uma comparação entre o gráfico de vibração do sensor ADXL (eixo da direita no gráfico) e a captação de energia com a pastilha piezoelétrica (eixo da esquerda no gráfico), ambos expressos em Volts. Este gráfico permite observar que as vibrações ressonantes possíveis são representadas por picos, assim como os picos de captação de energia. Nos pontos A, B e C destacados no gráfico, é possível notar que o aumento na captação de energia não está diretamente relacionado ao aumento da vibração e estão acima do que pode ser explicado apenas pela possível ressonância do sistema. Portanto, essas regiões foram identificadas como possíveis áreas de comportamento caótico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo investigar a captação de energia de vibração utilizando pastilhas piezoelétricas e estabelecer uma correlação entre a energia captada e a vibração gerada, com o intuito de identificar picos de captação de energia que não podem ser explicados apenas pela ressonância do sistema.

A próxima etapa desta pesquisa envolve a caracterização da dinâmica do sistema utilizando os expoentes de Lyapunov, a fim de quantificar seu comportamento dinâmico. Posteriormente, pretende-se controlar o comportamento do sistema por meio do método de Desigualdades Matriciais Lineares (LMI – Linear Matrix Inequalities), com o objetivo de maximizar a captação de energia.

AGRADECIMENTOS

Expressamos nossa gratidão à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo estímulo à pesquisa na graduação através do Programa de Iniciação Científica Voluntária (PIVIC). Também somos gratos à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação do Campus de Francisco Beltrão da UTFPR por fornecer os laboratórios de pesquisa e os equipamentos necessários para a realização deste trabalho.

CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

ABDELKEFI, A. Aeroelastic energy harvesting: A review. **International Journal of Engineering Science**, v. 100, p. 112–135, 1 mar. 2016.

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.

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.

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.

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.

HOWELLS, C. A. Piezoelectric energy harvesting. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 7, p. 1847–1850, jul. 2009.

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.

LIANG, J.; LIAO, W. H. Energy flow in piezoelectric energy harvesting systems. **Smart Materials and Structures**, v. 20, n. 1, jan. 2011.

LIU, H.; QIAN, Y.; LEE, C. A multi-frequency vibration-based MEMS electromagnetic energy harvesting device. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 204, p. 37–43, 2013.

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.

SAFAEI, M.; SODANO, H. A.; ANTON, S. R. A review of energy harvesting using piezoelectric materials: State-of-the-art a decade later (2008-2018). **Smart Materials and Structures**, v. 28, n. 11, 22 out. 2019.

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.

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