



Captação de energia de vibração caracterizando um provável comportamento caótico: estudo de caso em transporte público urbano

Vibration energy harvesting characterizing a probable chaotic behavior: case study in urban public transportation

Luiz Felipe Cassimano dos Santos¹, Luiza Morsche Romani², Kamily Fulber Basseio³, Marlon Abati⁴, Vinícius Franzen Ramilo⁵, Douglas da Costa Ferreira⁶

RESUMO

A captação de energia é um campo de estudo que se desenvolveu nos últimos 15 anos na busca de uma alternativa sustentável para produção de energia elétrica. Desde pequenos gradientes de temperatura, movimento do corpo humano, movimento de pequenas massas de ar, radiofrequência e vibração, o estudo de sistemas de captação de energia é vasto e abrange diversas áreas. Especificamente sobre energia de vibração, os estudos realizados, em sua maioria, abordam os possíveis aumentos de eficiência. Dentre esses trabalhos de pesquisa, destacam-se aqueles relativos à manutenção do comportamento na região de ressonância. Esse trabalho de pesquisa estudou o comportamento de um sistema de captação de energia de vibração, em um experimento onde ocorre uma captação de energia de vibração de um ônibus em movimento com o uso de patilhas piezoelétricas. O objetivo é verificar e constatar o possível comportamento caótico do sistema, para em trabalhos futuros realizar a manutenção desse comportamento com o intuito de aumentar a eficiência do sistema. Como resultado, foi possível verificar o possível comportamento caótico, pela observação de picos de captação de energia que não podem ser explicados pelos dados do sensor de vibração.

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

ABSTRACT

Energy capture is a field of study that has developed over the last 15 years in the search for a sustainable alternative for producing electrical energy. From small temperature gradients, movement of the human body, movement of small air masses, radiofrequency and vibration, the study of energy harvesting systems is vast and covers several areas. Specifically on vibration energy, most studies carried out address possible increases in efficiency. Among these research works, those relating to the maintenance of behavior in the resonance region stand out. This research work studied the behavior of a vibration energy capture system, in an experiment where vibration energy is captured from a moving bus using piezoelectric pads. The objective is to verify and verify the possible chaotic behavior of the system, so that in future work, this behavior can be maintained to increase the system's efficiency. As a result, it was possible to verify possible chaotic behavior by observing energy capture peaks that cannot be explained by vibration sensor data.

KEYWORDS: Energy Harvesting System; Vibration; Chaotic behavior.

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



INTRODUÇÃO

Emissões de gases de efeito estufa e os impactos ambientais das fontes de energia não-renováveis pelo aumento da demanda energética mundial tem levado à busca por fontes de energia limpa e renovável (GURUACHARYA; HOSSAIN, 2018). Nesse contexto, as pastilhas piezelétricas surgem como uma alternativa de geração de energia renovável, uma vez que são capazes de converter a energia mecânica em eletricidade (PRADEESH et al., 2020). A energia piezelétrica é uma das formas de aproveitamento de fontes de energia não convencionais que podem ser utilizadas para a geração de energia elétrica. As pastilhas piezoelétricas são dispositivos que podem ser aplicados em diversos contextos, tais como na captação de energia de vibrações, ondas do mar, fluxo de ar e até mesmo na respiração humana (WEI; JING, 2017).

Em particular, a captação de energia por vibração de um ônibus tem sido objeto de estudos recentes, já que os veículos de transporte público urbano podem gerar vibrações significativas em seu funcionamento diário (ABDELKAREEM et al., 2018). Diversos autores têm explorado essa possibilidade e proposto diferentes soluções para a captação de energia elétrica a partir das vibrações geradas pelos ônibus, como sistemas de captação de energia por vibração a partir da suspensão de um ônibus ou pela absorção de impactos nos eixos (ALI et al., 2021; DUONG; CHUN, 2020).

Dentre os diversos estudos para aumentar a eficiência dos sistemas de captação de energia de vibração, o foco desse trabalho é no comportamento caótico desses sistemas. Já existem estudos buscando maximizar a captação de energia utilizando o comportamento caótico de sistemas vibratórios (HENRIQUE; COSTA; SILVA, 2013), mas a maior parte dos trabalhos está concentrada 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 para aumentar a conversão da energia mecânica em energia elétrica.

Em 1963 o pesquisador Edward Norton Lorenz publicou seu trabalho intitulado “*Deterministic nonperiodic flow*”, estabelecendo o conceito do caos, muito conhecido pelos leigos no assunto como “Efeito Borboleta” o qual até já foi tema de filmes de Hollywood. O que é pouco conhecido é que muito antes dele, em 1893, o estudioso Russo Aleksandr Mikhailovich Lyapunov publicou o trabalho chamado “*On the form of a curve that satisfies a certain condition*” e introduziu o conceito de estabilidade de sistemas dinâmicos não-lineares por meio dos expoentes de Lyapunov, sendo que Lorenz 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. Apesar da significativa contribuição de Lyapunov para mensurar o caos e de Lorenz para estabelecer os conceitos dos sistemas caóticos, foi somente em 1985 que o estudioso Alan Wolf desenvolveu 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).

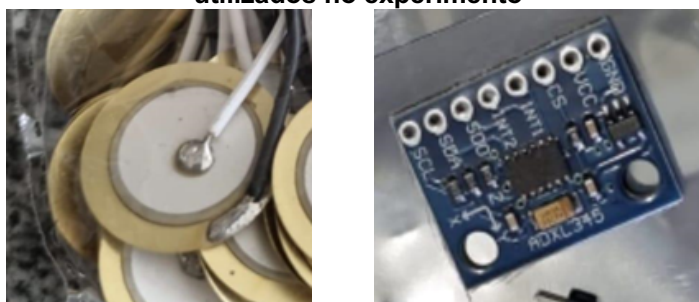
Este trabalho tem por objetivo estudar como um sistema que capta energia de vibração se comporta em relação à vibração que é gerada no sistema dinâmico, de modo a verificar se há coincidência entre os picos de energia captada e os picos de vibração e, assim, investigar a provável existência de um comportamento caótico nesse sistema, isto

é, onde o comportamento dinâmico desse sistema não pode ser explicado pelas condições iniciais.

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.

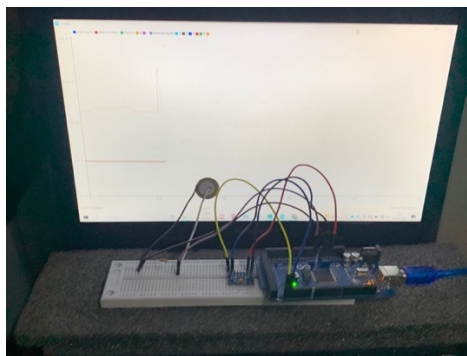
Figura 1 – Pastilha piezoelétrica de 20 mm com terminações soldadas e acelerômetro ADXL 345, utilizados no experimento



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).

Figura 2 – Aparato utilizado na coleta de dados



Fonte: Autoria própria (2023)

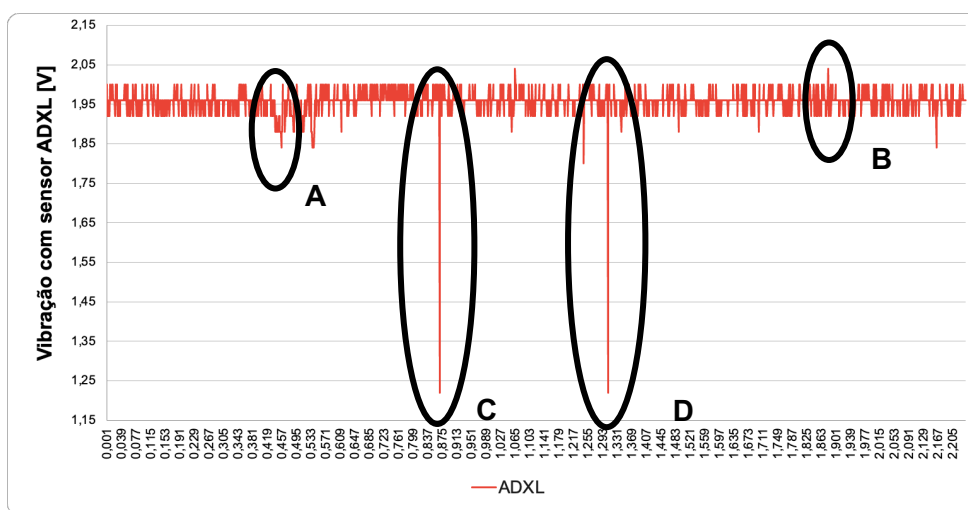
Para fazer a conexão entre os sensores e o Arduino foi utilizado um protoboard de 840 pinos e fios jumper que evitam a necessidade de soldagem. Para reduzir o ruído na leitura do sinal e proteger o pino analógico do Arduino, um resistor de 10 kohms foi conectado em série com a pastilha piezoelétrica. O programa desenvolvido para o Arduino foi configurado para efetuar leituras a intervalos regulares de 0,001 segundos (1 milésimo de segundo). O conjunto foi montado em um aparato de espuma, junto a um notebook para gravar os resultados, que ficou no colo de um indivíduo ao se deslocar com um ônibus urbano, durante o trajeto da UTFPR até o centro da cidade de Francisco Beltrão/PR, conforme mostra a Figura 2.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo do trajeto que durou em torno de 20 minutos, foram realizadas cinco coletas de dados com duração entre 1,0 e 2,0 minutos cada uma delas. Dentre as coletas de dados, foram intencionalmente selecionadas 2242 amostras de dados, para que fosse possível observar o fenômeno a que se propõem esse estudo. Importante registrar que o fenômeno ocorreu em todas as cinco coletas de dados, mas foram intencionalmente selecionadas amostras onde o fenômeno ficou mais evidente.

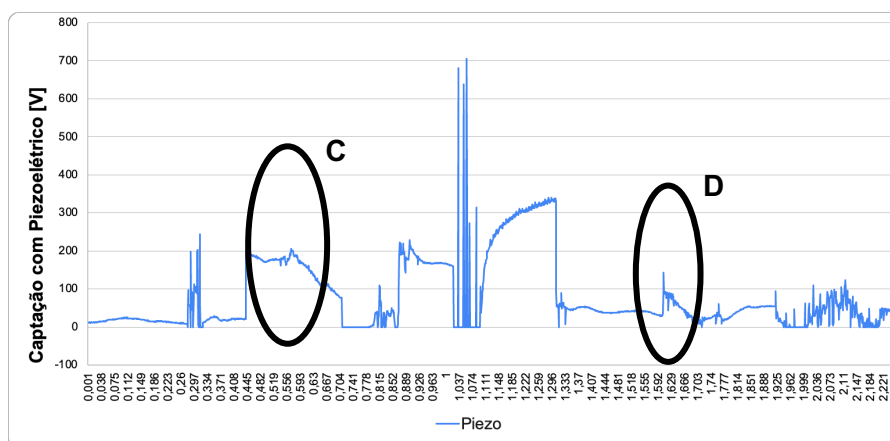
Figura 3 –Vibração com acelerômetro ADXL 345 e os picos de vibração



Fonte: Autoria própria (2023)

O gráfico com os resultados mostrados na Figura 3 são do acelerômetro ADXL 345. Os picos de vibração, onde estão indicados, como exemplo, os deslocamentos A e B podem indicar que a vibração do sistema entrou em ressonância com o aparato no qual está acoplado o acelerômetro ADXL 345. Os deslocamentos C e D podem indicar grandes solavancos ao qual o ônibus tenha sofrido.

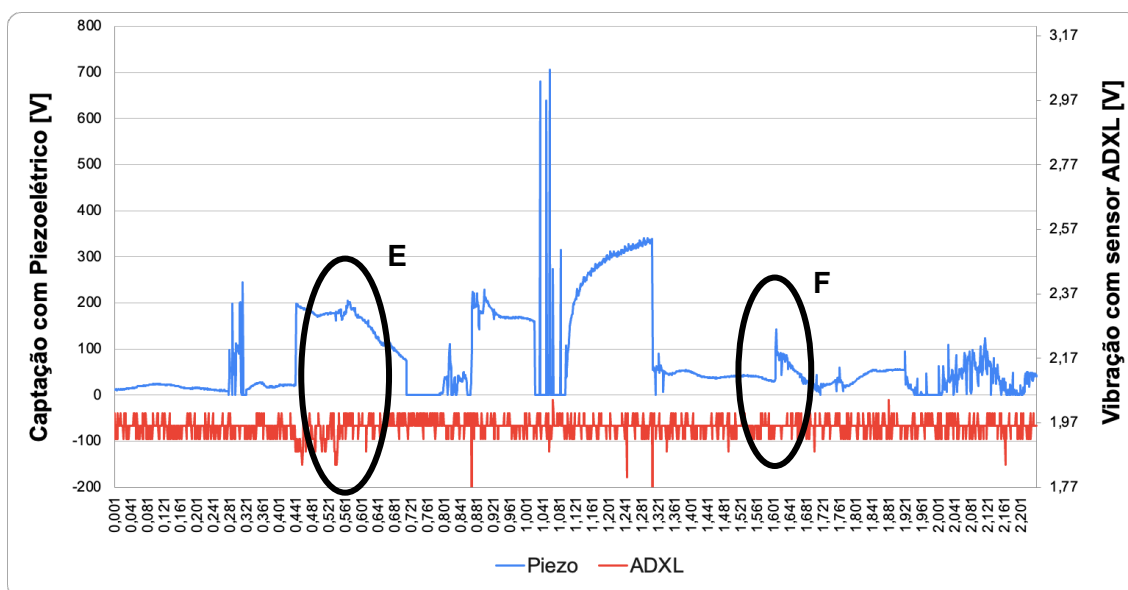
Figura 4 –Vibração com acelerômetro ADXL 345 e os picos de vibração



Fonte: Autoria própria (2023)

O gráfico da Figura 4 mostra a captação de energia com a pastilha piezoelétrica para as mesmas amostras de dados intencionalmente selecionadas. Neste gráfico é possível observar os picos de captação de energia, como exemplificado pelos deslocamentos C e D. É possível observar, como mostra a Figura 5, que os picos de vibração não são coincidentes com os picos de captação de energia, como exemplificado pelos pontos E e F. Sendo a existência de comportamento caótico, uma possível explicação para esse fenômeno.

Figura 5 – Captação de Energia da pastilha PZT x vibração com acelerômetro ADXL 345



Fonte: Autoria própria (2023)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível verificar um possível comportamento caótico do sistema, porque os picos de captação de energia não podem ser explicados pelos picos de vibração ou pela ressonância do sistema vibratório. O objetivo deste trabalho foi avaliar a relação entre a captação de energia de vibração com a vibração gerada por um ônibus em movimento, de tal forma a caracterizar picos de captação de energia que não podem ser explicadas somente com a ressonância do sistema ou por grandes deslocamentos que o ônibus possa ter sofrido. Em trabalhos futuros, para caracterizar e comprovar 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.

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.