ANÁLISE DE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA DE VIBRAÇÃO CARACTERIZANDO UM PROVÁVEL COMPORTAMENTO CAÓTICO: ESTUDO DE CASO EM UM TRANSPORTE PÚBLICO URBANO

Luiz Felipe Cassimano dos SANTOS[1], Kamily Fulber BASSEIO[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: luizfelipesantos@alunos.utfpr.edu.br, kamilyfulber@alunos.utfpr.edu.br, luizamorsche@alunos.utfpr.edu.br, marlonabati@alunos.utfpr.edu.br, viniciusramilo@alunos.utfpr.edu.br, douglasferreira@utfpr.edu.br

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. 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 irá estudar o comportamento de sistemas de captação de energia de vibração, em um experimento captando energia de vibração de um ônibus em movimento. O objetivo é verificar o possível comportamento caótico do sistema, para em trabalhos futuros realizar a manutenção desse comportamento com o intuito de aumentar a eficiência do sistema.*

Palavras-chave: *Sistema de Captação de Energia; Vibração; Comportamento caótico*

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 (HARB, 2011). 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).

A utilização de pastilhas piezoelétricas na geração de energia elétrica é uma forma promissora de produzir energia limpa e renovável de forma sustentável, visto que sua instalação e manutenção são simples, sem necessidade de grandes obras de infraestrutura (LIANG; LIAO, 2011). Além disso, a energia piezoelétrica pode ser uma opção para regiões remotas que não possuem acesso à rede elétrica convencional. A captação de energia elétrica por meio de vibrações é um tema de grande relevância e interesse no campo da geração de energia renovável (SODANO; INMAN, 2004).

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; PRADEESH et al., 2020).

Os trabalhos sobre melhorar a eficiência dos sistemas de captação de energia de vibração, em geral, exploram o efeito da ressonância, como realizar projetos de elementos com vários modos de vibração (LIU; QIAN; LEE, 2013) e estudos estatísticos para projetar o sistema de forma que fique a maior parte do tempo em ressonância (MCINNES; GORMAN; CARTMELL, 2008). Também existem diversos trabalhos com sistemas híbridos, ou seja, que captam energia da vibração e de outras fontes ao mesmo tempo, por exemplo unindo a vibração e o efeito eletromagnético do corpo se movimentando pelo efeito da vibração (IQBAL; KHAN, 2018; OWENS; MANN, 2012; WANG et al., 2007) e captação de energia de vibração, solar e térmica (GAMBIER et al., 2012).

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; HENRIQUE CERQUEIRA COSTA BASQUEROTTO; FÁBIO ROBERTO CHAVARETTE; SAMUEL DA SILVA, [s.d.]), 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.

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 (DOROSHIN, 2011; SPROTT, 2014) e mensurados em um sistema dinâmico não-linear por meio dos Expoentes de Lyapunov (DANCA; KUZNETSOV, 2018).

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 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. 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 volts e terminações positivas e negativas soldadas na pastilha, conforme mostra a figura 01

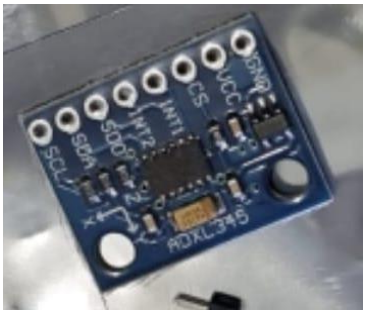
Figura 1 – Pastilha piezoelétrica de 20 mm com terminações soldadas, utilizada no experimento

Fonte: Autoria própria (2023)

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 02.

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.

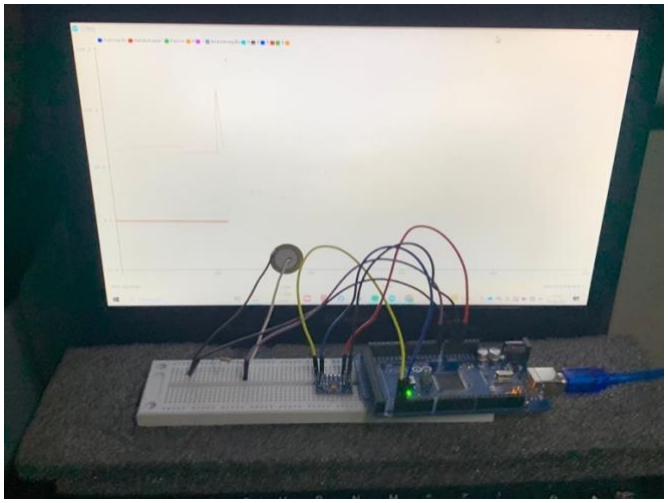
Figura 2 –Acelerômetro ADXL 345 utilizado no experimento



Fonte: Autoria própria (2023)

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 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 03.

Figura 3 – Aparato montado, que ficou no colo durante a coleta de dados



Fonte: Autoria própria (2023)

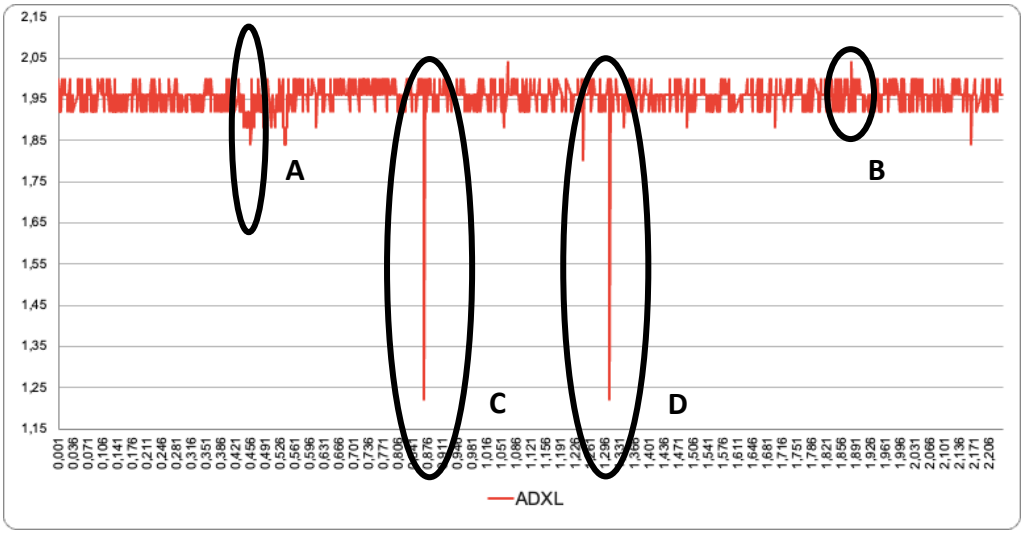
Os dados coletados foram utilizados para analisar a relação da vibração com a energia produzida pelas pastilhas ônibus, sendo possível gerar um gráfico de energia captada e variação da vibração ao longo do tempo do experimento. Neste experimento, o trajeto foi realizado em 20 min no total da rota do ônibus urbano, sendo selecionadas 2242 amostras de dados a serem discutidos nos resultados.

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.

O gráfico com os resultados mostrados na figura 04 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.

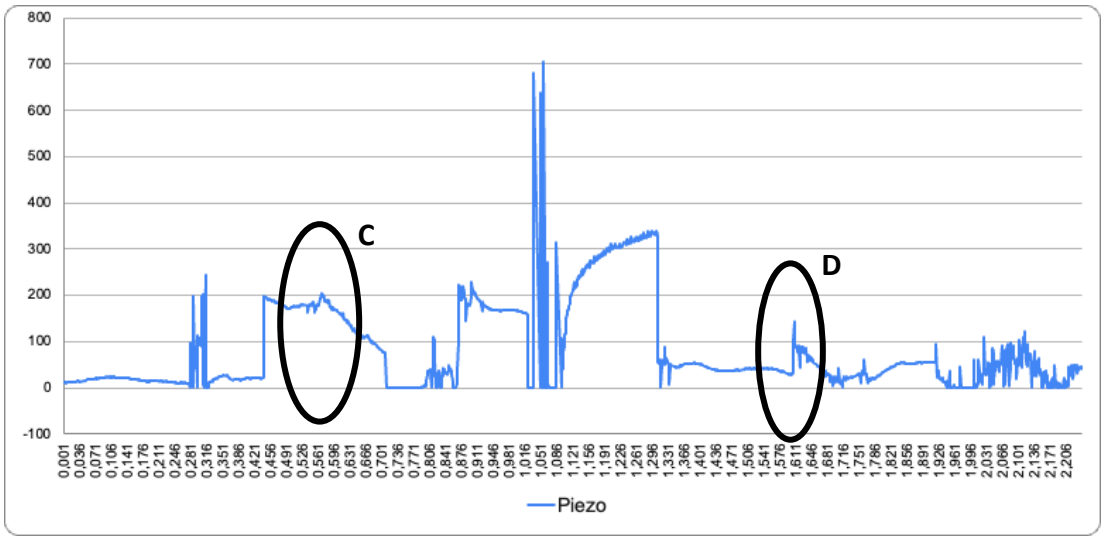
Figura 4 –Vibração com acelerômetro ADXL 345 e os picos de vibração



Fonte: Autoria própria (2023)

O gráfico da figura 05 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.

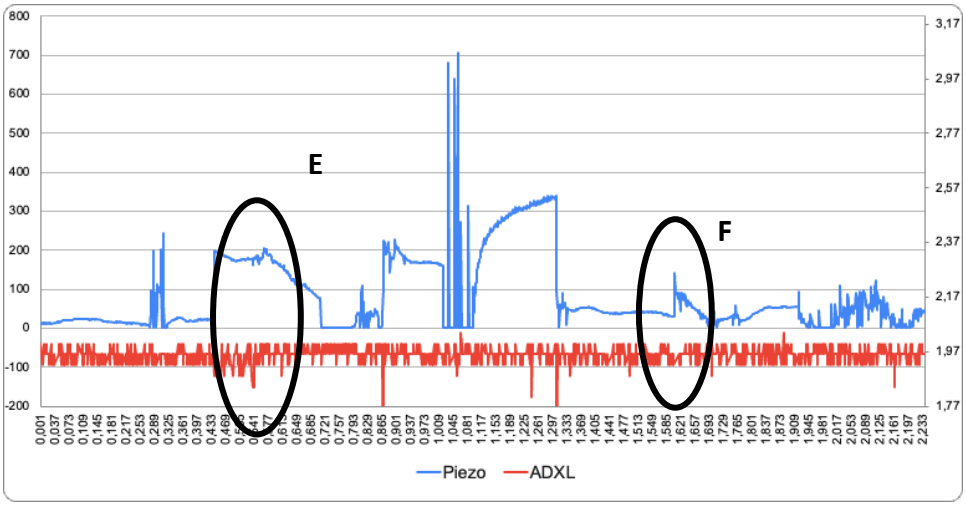
Figura 5 –Vibração com acelerômetro ADXL 345 e os picos de vibração



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. Sendo a existência de comportamento caótico, uma possível explicação para esse fenômeno.

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 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. Dessa maneira definir 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. Em os expoentes de Lyapunov sendo positivos, então se confirma a hipótese de que os picos de energia captada são resultado do comportamento caótico do sistema dinâmico estudado.

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

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.

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.

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.

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.

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.

HARB, A. Energy harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy*, v. 36, n. 10, p. 2641–2654, out. 2011.

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.

HENRIQUE CERQUEIRA COSTA BASQUEROTTO FÁBIO ROBERTO CHAVARETTE; SAMUEL DA SILVA, C. *EXPLOITING NONLINEARITIES AND CHAOS TO ENHANCE ENERGY HARVESTING SYSTEM USING PIEZOELECTRIC DEVICES*. [s.l: s.n.].

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.

MCINNES, C. R.; GORMAN, D. G.; CARTMELL, M. P. Enhanced vibrational energy harvesting using nonlinear stochastic resonance. *Journal of Sound and Vibration*, v. 318, n. 4–5, p. 655–662, 23 dez. 2008.

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.

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.

SODANO, H. A.; INMAN, D. J. *A Review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials*. [s.l: s.n.].

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.

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.

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