

## **XI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA**

Itapetininga, 27, 28 e 29 de maio de 2025

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

*Campus Itapetininga*

### **ANÁLISE DO CAOS EM SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA – ESTUDO DE CASO**

Esther Bertoldo Nantes – PIBIC/Fund. Araucária<sup>1</sup>

Prof. Dr. Douglas da Costa Ferreira -UTFPR<sup>2</sup>

#### **Introdução**

O conceito de captação de energia está geralmente associado ao aproveitamento da energia presente no ambiente, que é convertida em energia elétrica. Nos últimos anos, a pesquisa sobre tecnologia de captação de energia tem ganhado destaque, impulsionando o desenvolvimento de dispositivos microeletrônicos autoalimentados (ALI; IBRAHIM, 2012). Um exemplo comum de energia desperdiçada são as vibrações ambientais, presentes ao redor de máquinas e sistemas biológicos. Essa fonte de energia é particularmente adequada para o uso de materiais piezoelétricos, que possuem a capacidade de converter energia mecânica de deformação em energia elétrica e vice-versa (SODANO; INMAN; PARK, 2005). A piezoelectricidade foi descoberta por Jacques e Pierre Curie em 1880 (ALI; IBRAHIM, 2012). Os materiais piezoelétricos pertencem a uma classe de cristais capazes de gerar tensão elétrica entre suas extremidades quando submetidos a pressão, fenômeno conhecido como efeito piezoelétrico direto. Da mesma forma, quando expostos a um campo elétrico, esses materiais sofrem deformação mecânica, convertendo energia elétrica em movimento mecânico — processo denominado efeito piezoelétrico inverso. Com base nesse princípio, o atuador piezoelétrico é projetado como um componente de acionamento altamente eficiente (E et al., 2015). O caos, por sua vez, refere-se a um tipo de movimento aparentemente aleatório e irregular, característico de sistemas não lineares determinados. Ele está amplamente presente em sistemas VEH (Vibration Energy Harvesting – de Captação de energia de vibração) não lineares e sua principal característica é a extrema sensibilidade às condições iniciais, o que leva a um comportamento imprevisível a longo prazo. Diversas abordagens foram desenvolvidas para identificar a ocorrência de caos em sistemas VEH. O limite de amplitude para a transição ao comportamento caótico pode ser determinado por meio de cálculos numéricos baseados no maior expoente de Lyapunov (LIU; XU; LI, 2017).

#### **Objetivo**

Os objetivos são avaliar se as oscilações significativas na energia captada são correspondentes diretamente às variações apresentadas nos gráficos de aceleração. Em havendo discrepância observa-se que os picos da energia captada não podem ser explicados pelo aumento da vibração, dessa maneira, considera-se que a complexidade das interações entre os fenômenos mecânicos e elétricos em sistemas dinâmicos podem apresentar comportamento caótico.

---

<sup>1</sup>Estudante do curso de Engenharia Química, UTFPR– Francisco Beltrão/PR. E-mail: estherbertoldonantes@alunos.utfpr.edu.br

Doutor. UTFPR – Francisco Beltrão/PR. E-mail: douglasferreira@utfpr.edu.br.

## **XI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA**

Itapetininga, 27, 28 e 29 de maio de 2025

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

*Campus Itapetininga*

### **Metodologia**

O experimento foi montado utilizando-se um Arduino Uno, com a seguinte especificação: microcontrolador ATmega328, velocidade do *clock* de 16 MHz, 20 pinos digitais de entrada e saída, dos quais 6 podem ser usados como PWM (Pulse Width Modulation - Modulação por Largura de Pulso), 6 portas analógicas e tensão de operação de 5 V. Também foi empregado um acelerômetro triaxial ADXL345, que realiza leituras com conversão em unidades de gravidade (g), possui faixa de operação de  $\pm 16g$ , 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 inferior a  $1^\circ$ , com saída digital de 16 bits. Além disso, utilizou-se uma pastilha piezoelétrica de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) de 20 mm de diâmetro, com tensão máxima de 30 volts e terminações positivas e negativas. Para a coleta de dados de aceleração e tensão, foi desenvolvido um código em MATLAB que se comunica com o Arduino Uno, integrando o sensor ADXL345 e a pastilha piezoelétrica acoplada a um motor elétrico de 160 W, operando na faixa de 127 V com variação aceitável de 10% conforme regulamentação vigente (ANEEL, 2021), o qual transmite vibrações. Durante o experimento, foram medidas tanto a vibração gerada pelo motor quanto a energia elétrica captada pela pastilha. Para isso, o Arduino realizou leituras da aceleração no eixo x, o acelerômetro gera leitura nos três eixos, no entanto a pastilha piezoelétrica foi posicionada axialmente ao eixo x para maximizar o efeito de captação de energia e possibilitar uma melhor leitura dos dados, dessa maneira, contribuindo para o propósito dessa pesquisa, e da tensão no pino analógico, em um ciclo de 25.000 leituras, com taxa de amostragem de 100 amostras por segundo, ao longo de 250 segundos, enviando os dados diretamente para o MATLAB. Após a coleta, os valores foram exibidos em um gráfico com dois eixos: um representando a aceleração e o outro, a tensão, permitindo analisar a relação entre a vibração do motor e a energia elétrica captada. As medições de aceleração foram realizadas no eixo x por meio do sensor ADXL345, enquanto a tensão foi registrada simultaneamente.

### **Resultados**

Foi gerado um gráfico com os resultados da vibração e da captação de energia. Ao analisar os dados e o gráfico, pode-se observar alguns picos acentuados antes dos 50 segundos, assim como outros picos distribuídos ao longo do experimento, que totalizou um tempo de 250 segundos. A média da variação da vibração medida com o ADXL345 se manteve relativamente constante durante todo o experimento, oscilando entre 5,5 g e 7,7 g. No entanto, a captação de energia elétrica medida com a pastilha piezoelétrica apresentou comportamento mais variável. Nos primeiros 20 segundos, a tensão gerada permaneceu dentro da faixa de 0,3 V a 0,6 V, o que indica uma menor intensidade de vibração útil ou uma menor eficiência momentânea na conversão da energia mecânica em elétrica. Já entre os 20 e 30 segundos, observou-se um aumento na amplitude da tensão, com valores variando entre 1,0 V e 1,5 V, o que pode estar associado ao aumento da intensidade das vibrações ou à maior ressonância da pastilha piezoelétrica com o motor nesse intervalo. Essas faixas de tensão indicam o nível de energia elétrica que pôde ser convertida a partir das vibrações mecânicas do motor. Valores mais baixos (como os de 0,3 V a 0,6 V) sugerem baixa transferência de energia, enquanto faixas mais elevadas (de 1,0 V a 1,5 V) demonstram uma maior eficiência na conversão de vibração em eletricidade, possivelmente devido a uma frequência de excitação mais próxima da frequência natural da pastilha

## **XI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA**

Itapetininga, 27, 28 e 29 de maio de 2025

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

*Câmpus Itapetininga*

piezoelétrica, o que favorece a captação. Ao longo do experimento, apesar da vibração se manter dentro de uma faixa média constante, a resposta da pastilha variou significativamente, sugerindo que fatores como frequência da vibração, acoplamento mecânico e a própria natureza do material piezoelétrico influenciam diretamente a quantidade de energia captada.

### **Conclusão**

A variação da captação de energia não está de acordo com variação da vibração. O esperado é que a variação de captação de energia dependesse da variação da vibração; como a variação da vibração é constante, a variação da captação de energia também deveria ser constante, o que não aconteceu. Uma possível explicação para esse comportamento é a existência do comportamento caótico no sistema. A variação da frequência de vibração afeta tanto o acelerômetro quanto a pastilha piezoelétrica, não justificando o comportamento observado. A composição da liga da pastilha influencia na escala da energia captada e possíveis falhas no acoplamento da pastilha no motor iriam influenciar na amplitude da energia captada. Os picos de energia captada que não coincidem com os picos de vibração não podem ser explicados por esses fatores. Pode-se concluir que existe uma forte inclinação de que haja comportamento caótico na captação de energia.

### **Referências**

- ALI, W. G.; IBRAHIM, S. W. Power Analysis for Piezoelectric Energy Harvester. **Energy and Power Engineering**, v. 04, n. 06, p. 496–505, 2012.
- SODANO, H. A.; INMAN, D. J.; PARK, G. Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 16, n. 10, p. 799–807, out. 2005.
- ALI, W. G.; IBRAHIM, S. W. Power Analysis for Piezoelectric Energy Harvester. **Energy and Power Engineering**, v. 04, n. 06, p. 496–505, 2012.
- LIU, D.; XU, Y.; LI, J. Randomly-disordered-periodic-induced chaos in a piezoelectric vibration energy harvester system with fractional-order physical properties. **Journal of Sound and Vibration**, v. 399, p. 182–196, 2 abr. 2017.
- E, J. et al. Design of the  $H^\infty$  robust control for the piezoelectric actuator based on chaos optimization algorithm. **Aerospace Science and Technology**, v. 47, p. 238–246, dez. 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL)**. Resolução Normativa nº 956, de 15 de março de 2021. Estabelece os requisitos técnicos para fornecimento de energia elétrica em tensão de distribuição. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2025.