

ENERGIA HÍBRIDA EÓLICA-SOLAR: SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA COM VIBRAÇÕES ESTRUTURAIS INDUZIDAS PELO VENTO PARA AGRICULTURA INTELIGENTE

EDUARDO MACHADO ANESSI^{1,2*}, JORGE LUIS PALACIOS FELIX^{2,3}

1 Introdução

A crescente utilização de sensores e dispositivos eletrônicos na agricultura inteligente tem aumentado a demanda por fontes de energia autônomas e sustentáveis. Nesse contexto, os sistemas de Energy Harvesting destacam-se por converter energia disponível no ambiente em eletricidade, reduzindo a dependência de baterias e ampliando a autonomia de dispositivos de monitoramento (ZHU et al., 2021).

Entre as tecnologias de colheita de energia, a conversão piezoelétrica por vibrações induzidas por vórtices (Vortex-Induced Vibrations – VIV) destaca-se pelo aproveitamento da energia do vento em baixas velocidades. A integração desse mecanismo com módulos fotovoltaicos possibilita o desenvolvimento de sistemas híbridos capazes de aproveitar simultaneamente as energias eólica e solar, aumentando a disponibilidade energética para aplicações em sensores autônomos (LAI et al., 2021; XIA et al., 2023).

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe o desenvolvimento e a avaliação experimental de um sistema híbrido de colheita de energia baseado em uma estrutura em L, integrando conversão piezoelétrica e fotovoltaica para alimentação de sensores aplicados à agricultura inteligente.

2 Objetivos

Objetivo geral

Desenvolver e avaliar um sistema híbrido de colheita de energia, baseado na integração entre conversão fotovoltaica e piezoelétrica em uma estrutura tipo L submetida a vibrações induzidas pelo vento, visando à alimentação autônoma de sensores aplicados à agricultura inteligente.

1 Graduando em agronomia, UFFS, *campus* Cerro Largo, contato: a96347358@gmail.com

2 Grupo de Pesquisa: Recursos Energéticos e Tecnologias Limpas - RETEC

3 Doutor em Engenharia Mecânica pela UNICAMP. Professor efetivo do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária e do Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) *campus* Cerro Largo, RS. E-mail: jorge.felix@uffs.edu.br. Orientador.

Objetivos específicos

- Desenvolver um protótipo híbrido em estrutura tipo L;
- Caracterizar o desempenho do módulo fotovoltaico sob diferentes condições de iluminação;
- Avaliar a resposta elétrica do sistema piezoelétrico em diferentes velocidades do vento;
- Analisar o potencial da integração entre as conversões piezoelétrica e fotovoltaica.

3 Metodologia

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Física Experimental da UFFS, Campus Cerro Largo, envolvendo revisão bibliográfica, construção do protótipo e caracterização experimental dos subsistemas piezoelétrico e fotovoltaico.

O protótipo foi constituído por uma estrutura de alumínio em formato de L, com cilindro de PVC para indução das vibrações, módulo fotovoltaico instalado sobre o cilindro e elemento piezoelétrico fixado próximo ao engaste. As principais especificações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações técnicas do protótipo híbrido.

Especificação	Valor	Especificação	Valor
Configuração estrutural	Tipo L	Material do cilindro	PVC
Material da estrutura	Alumínio	Dimensões do cilindro	75 × 150 mm
Espessura da chapa	1 mm	Massa do cilindro	91 g
Largura das vigas	20–25 mm	Módulo fotovoltaico	Monocristalino
Viga vertical	270 mm	Diâmetro do módulo FV	9,4 cm
Viga horizontal	120 mm	Tensão / Corrente	5,5 V / 180 mA

Fonte: Elaborado pelo autor.

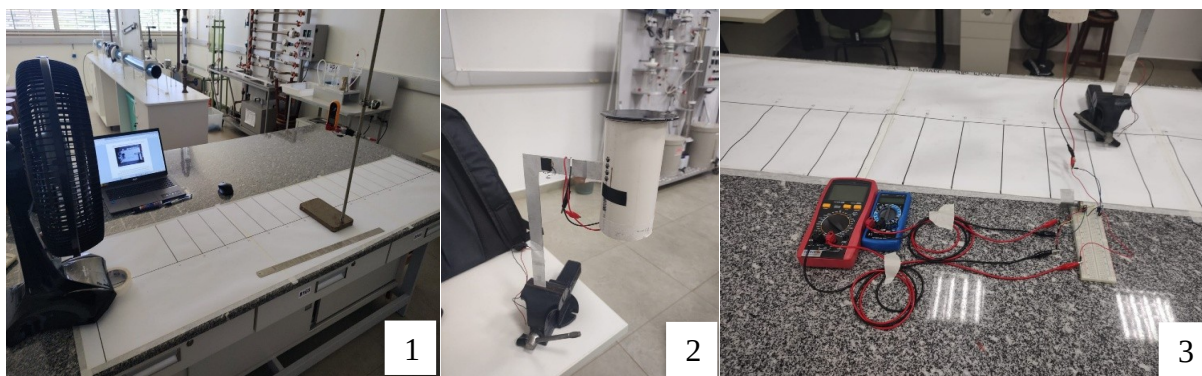
Os ensaios experimentais foram realizados utilizando ventilador de velocidade variável, anemômetro digital, osciloscópio, multímetro e luxímetro (Figura 1). O sistema piezoelétrico foi submetido às velocidades de 4,2, 4,4 e 4,6 m s⁻¹, registrando-se VPP e Vrms. A potência piezoelétrica foi estimada pela relação $P_{PZL} = V^2_{rms}/R$, considerando a impedância de entrada do osciloscópio de 1 MΩ. Assim, os valores representam a potência estimada nas condições de medição, não necessariamente a máxima potência disponível pelo transdutor.

O módulo fotovoltaico foi caracterizado sob iluminação artificial (Figura 1), medindo-se tensão e corrente nas distâncias de 10 e 20 cm da fonte luminosa, sendo a potência determinada por $P_{FV} = V \times I$. A iluminação incidente foi caracterizada por luxímetro. Como foi

medida iluminância (lux), e não irradiância (W m^{-2}), os resultados representam condições controladas de laboratório e não são diretamente equivalentes à radiação solar em campo.

Os subsistemas foram fisicamente integrados, mas não eletricamente conectados a uma carga comum. Portanto, suas potências foram determinadas separadamente e a potência híbrida foi apenas estimada pela soma matemática $P_H = P_{FV} + P_{PZL}$, não correspondendo a uma potência conjunta experimentalmente medida.

Figura 1 – (1) Bancada experimental dos ensaios piezoelétricos, (2) Protótipo híbrido construído, (3) Bancada experimental para os ensaios do módulo fotovoltaico.



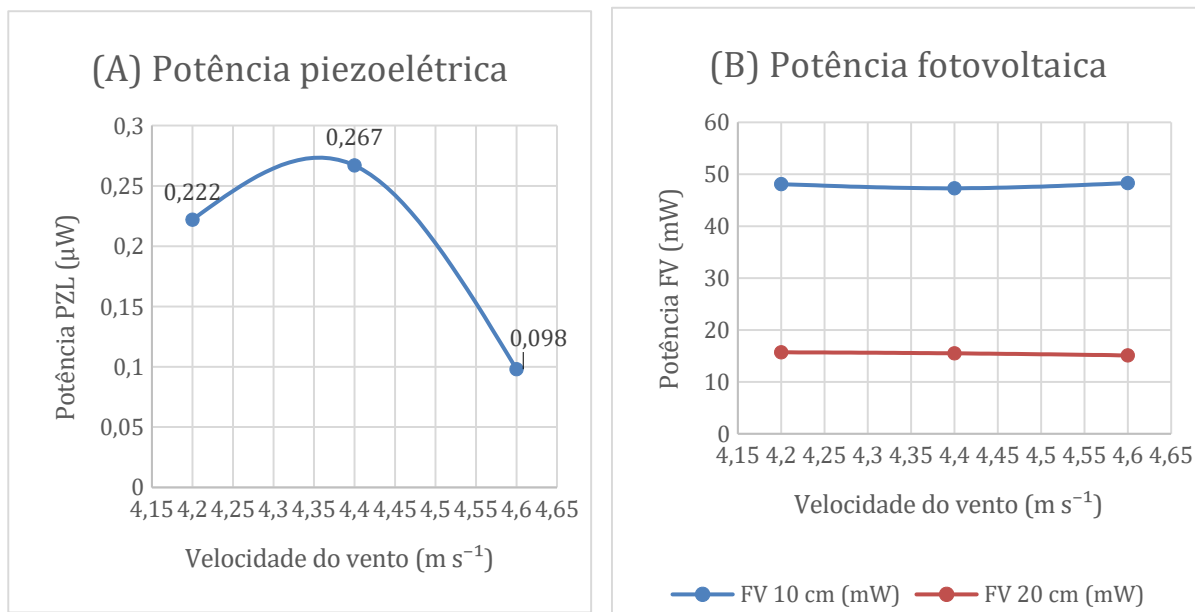
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4 Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta o comportamento das duas fontes de geração avaliadas. Para o sistema piezoelétrico (Figura 2A), as potências estimadas foram de 0,222, 0,267 e 0,098 μW para 4,2, 4,4 e 4,6 m s^{-1} , respectivamente. O maior valor foi obtido em 4,4 m s^{-1} . Entretanto, como não foram realizadas repetições independentes das medições de potência em cada condição, os resultados são apresentados de forma descritiva, não permitindo avaliar a significância estatística das diferenças observadas.

Para o sistema fotovoltaico (Figura 2B), com o módulo submetido à vibração nas mesmas velocidades de vento, foram obtidas potências entre 47,3 e 48,3 mW a 10 cm da fonte luminosa e entre 15,1 e 15,7 mW a 20 cm. A pequena variação observada entre as velocidades não pode ser atribuída ao efeito da vibração sobre a geração fotovoltaica, pois não foi realizada uma condição de referência equivalente sem vibração. A maior potência a 10 cm está associada à maior iluminação incidente. Como foi medida iluminância (lux), e não irradiância (W m^{-2}), os resultados representam as condições específicas do ensaio laboratorial e não permitem extrapolação direta para condições solares de campo (MICHAEL; JOHNSTON; MORENO, 2020).

Figura 2 - Potência gerada pelos subsistemas do protótipo: (A) potência piezoelétrica estimada (PZL); (B) potência fotovoltaica (FV) com o módulo submetido à vibração nas diferentes velocidades do vento, nas distâncias de 10 e 20 cm da fonte luminosa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para comparar as contribuições das duas fontes, as potências foram convertidas para a mesma unidade e combinadas matematicamente conforme $P_H = P_{FV} + P_{PZL}$ (Figura 3). Essa potência híbrida representa uma estimativa matemática, uma vez que os subsistemas não foram eletricamente conectados e avaliados em uma carga comum.

Figura 3.

$$I = PFV + PPZL$$

Nas condições avaliadas, a geração fotovoltaica foi predominante. Considerando, por exemplo, a condição de 4,4 m s⁻¹ e 10 cm, foram obtidos 47,3 mW para o sistema fotovoltaico e 0,000267 mW para o piezoelétrico, correspondendo a uma diferença de aproximadamente cinco ordens de grandeza. Nessa condição, a contribuição piezoelétrica representou cerca de 0,00056% da soma das potências. Portanto, os resultados obtidos não demonstram vantagem energética significativa decorrente da incorporação do subsistema piezoelétrico, indicando a necessidade de sua otimização antes da aplicação proposta.

5 Conclusão

O protótipo permitiu avaliar conjuntamente as conversões fotovoltaica e piezoelétrica em uma mesma estrutura. Nas condições estudadas, a geração fotovoltaica foi predominante, enquanto a potência piezoelétrica apresentou contribuição energética reduzida e insuficiente para justificar, isoladamente, sua aplicação direta na alimentação dos sensores considerados. Além disso, a integração realizada foi física, sendo a potência híbrida apenas estimada matematicamente. Estudos futuros deverão priorizar a otimização do subsistema piezoelétrico e a integração elétrica das fontes, avaliando seu benefício energético ou funcional para aplicações em sensores agrícolas.

Referências Bibliográficas

AHMED, M. et al. A review of vortex-induced vibration energy harvesting using piezoelectric materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 162, 2022.

LIANG, Z. et al. Enhanced broadband vortex-induced vibration piezoelectric energy harvester with L-shaped structure. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 220, 2024.

LIU, H. et al. Recent advances in vortex-induced vibration energy harvesting technologies. **Applied Energy**, v. 292, 2021.

MICHAEL, Peter R.; JOHNSTON, Danvers E.; MORENO, Wilfrido. A conversion guide: solar irradiance and lux illuminance. *Journal of Measurements in Engineering*, v. 8, n. 4, p. 153–166, 2020.

XIA, LILI; MA, SHAOFEI; TAO, PENG; PEI, WANPENG; LIU, YONG; TAO, LEI; WU, YIPENG. A wind-solar hybrid energy harvesting approach based on wind-induced vibration structure applied in smart agriculture. **Micromachines**, v. 14, n. 1, art. 58, 2023.

YU, PENGBO; HOU, CHENGWEI; ZHAO, QINGLING; LIU, SHIYU; SONG, RUJUN; ZHANG, LEIAN. Design and experimental investigation of an L-shaped piezoelectric energy harvester with vortex-induced vibration. **Ferroelectrics**, v. 598, n. 1, p. 25–34, 2022.

Palavras-chave: Piezoeletricidade; Fotovoltaica; Vórtices; Energia híbrida; Sensores.

Nº de Registro no sistema Prisma: PES-2025-0373

Financiamento: