contecc 2026
CONGRESSO TÉCNICO-CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA WPT COM APOIO DE MODELAGEM ESTATÍSTICA

VITÓRIA DE JESUS SANTOS[1] e MARCELO DOS SANTOS[2]

[1]Graduanda do curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, IFBA, Paulo Afonso-BA, 202320010022@ifba.edu.br;
[2]DSc. do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, IFBA, Paulo Afonso-BA, marcelo.santos@ifba.edu.br;

RESUMO: A Transferência de Energia Sem Fio (Wireless Power Transfer – WPT) tem se consolidado como uma tecnologia promissora para aplicações em dispositivos eletrônicos, equipamentos biomédicos e veículos elétricos, demandando soluções que ampliem sua eficiência energética e confiabilidade operacional. Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um protótipo experimental de baixo custo baseado em acoplamento indutivo ressonante, concebido para avaliar o comportamento de sistemas WPT sob diferentes condições de operação. O sistema foi instrumentado para aquisição de grandezas elétricas, como tensão, frequência de operação e potências de entrada e saída, possibilitando a determinação da eficiência energética do conjunto transmissor-receptor. Como suporte à interpretação dos resultados experimentais, foi empregada uma modelagem estatística multivariada, permitindo investigar a influência conjunta de variáveis operacionais e ambientais, incluindo distância entre bobinas, temperatura, umidade relativa do ar, interferência eletromagnética e presença de obstáculos físicos. Os resultados experimentais evidenciam que a eficiência do protótipo é fortemente dependente do alinhamento e da distância entre as bobinas, confirmando o comportamento previsto pela teoria do acoplamento indutivo. A análise estatística mostrou-se uma ferramenta eficaz para organizar, interpretar e quantificar a contribuição relativa das variáveis investigadas, fornecendo subsídios para futuras estratégias de otimização do sistema. O estudo demonstra que a integração entre experimentação e modelagem estatística constitui uma abordagem promissora para o desenvolvimento de sistemas WPT mais eficientes, robustos e adaptáveis às condições reais de operação, contribuindo para o avanço de tecnologias voltadas à eletrificação inteligente e à transição energética.

PALAVRAS-CHAVE: Transferência de Energia Sem Fio, Eficiência Energética, Acoplamento Indutivo; Modelagem Estatística, Protótipo Experimental.

DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF A WPT SYSTEM WITH SUPPORT OF STATISTICAL MODELING

ABSTRACT: Wireless Power Transfer (WPT) has emerged as a promising technology for applications in electronic devices, biomedical equipment, and electric vehicles, driving the need for solutions that enhance both energy efficiency and operational reliability. This study presents the development of a low-cost experimental prototype based on resonant inductive coupling, designed to evaluate the performance of WPT systems under different operating conditions. The prototype was instrumented to acquire key electrical parameters, including voltage, operating frequency, and input and output power, enabling the assessment of the energy efficiency of the transmitter–receiver system. To support the interpretation of the experimental results, a multivariate statistical modeling approach was employed to investigate the combined effects of operational and environmental variables, including coil separation distance, temperature, relative humidity, electromagnetic interference, and the presence of physical obstacles. The experimental results demonstrate that the prototype efficiency is strongly influenced by coil alignment and separation distance, corroborating the behavior predicted by the theory of resonant

inductive coupling. Furthermore, the statistical analysis proved to be an effective tool for organizing, interpreting, and quantifying the relative contribution of the investigated variables, providing valuable insights for future system optimization strategies. The findings indicate that integrating experimental investigation with statistical modeling represents a promising approach for the development of more efficient, robust, and adaptable WPT systems operating under real-world conditions, thereby contributing to advances in intelligent electrification technologies and the ongoing energy transition.

KEYWORDS: Wireless Power Transfer (WPT), Energy Efficiency, Inductive Coupling, Statistical Modeling, Experimental Prototype.

INTRODUÇÃO

A Transferência de Energia Sem Fio (*Wireless Power Transfer* – WPT) representa uma das tecnologias mais promissoras para a eletrificação inteligente, permitindo a transmissão de energia elétrica sem contato físico entre fonte e carga. Baseada principalmente no princípio do acoplamento indutivo ressonante, essa tecnologia vem sendo aplicada em carregadores de dispositivos eletrônicos, equipamentos biomédicos implantáveis, sensores industriais, robótica móvel e, mais recentemente, em sistemas de recarga de veículos elétricos (Trivino et al., 2021). O crescente interesse pela WPT decorre do potencial de aumentar a flexibilidade operacional, reduzir o desgaste mecânico provocado por conexões convencionais e contribuir para soluções energéticas mais seguras, sustentáveis e eficientes.

Apesar dos avanços alcançados na eletrônica de potência e no projeto de circuitos ressonantes, a eficiência energética continua sendo um dos principais desafios para a ampla utilização dessa tecnologia. O desempenho dos sistemas WPT depende simultaneamente de fatores como a distância e o alinhamento entre as bobinas, a frequência de operação, a geometria dos enrolamentos e as condições ambientais, que podem introduzir perdas adicionais e comprometer a transferência de potência (Kim et al., 2016; Jiang et al., 2017). Dessa forma, a construção e a avaliação experimental de protótipos constituem etapas fundamentais para compreender o comportamento real desses sistemas e subsidiar futuras melhorias de projeto.

Embora diversos estudos investiguem aspectos eletromagnéticos da transferência de energia sem fio, a maioria concentra-se em análises teóricas ou simulações numéricas, frequentemente desconsiderando a influência conjunta das variáveis ambientais e operacionais sobre a eficiência do sistema. Trabalhos recentes reconhecem que fatores como temperatura, umidade, interferências eletromagnéticas e obstáculos físicos podem alterar significativamente o desempenho dos sistemas WPT (Hasan et al., 2020; Zhang, 2021; Li et al., 2022; Kumar et al., 2023), porém ainda são escassos os estudos que integram resultados experimentais com ferramentas estatísticas capazes de apoiar a interpretação quantitativa desses efeitos.

Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação experimental de um protótipo de Transferência de Energia Sem Fio baseado em acoplamento indutivo ressonante. O protótipo foi instrumentado para a obtenção de parâmetros elétricos utilizados na determinação da eficiência energética do sistema, enquanto uma abordagem de modelagem estatística multivariada foi empregada como ferramenta de apoio para analisar a influência das principais variáveis operacionais e ambientais sobre o desempenho observado. Dessa forma, busca-se fornecer subsídios para a otimização de sistemas WPT e contribuir para o desenvolvimento de soluções energeticamente mais eficientes e adaptáveis às condições reais de operação.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza experimental, fundamentada no desenvolvimento e avaliação de um protótipo de Transferência de Energia Sem Fio (Wireless Power Transfer – WPT) baseado no princípio do acoplamento indutivo ressonante. O sistema foi projetado para investigar o comportamento da transferência de potência entre uma bobina transmissora e uma bobina

receptora sob diferentes condições de operação, permitindo a obtenção de parâmetros elétricos necessários à avaliação da eficiência energética.

O protótipo foi constituído por duas bobinas de cobre esmaltado acopladas magneticamente, alimentadas por um circuito oscilador de alta frequência. Durante os ensaios experimentais foram realizadas medições de tensão máxima, tensão eficaz (RMS), frequência de operação, potência de entrada e potência de saída, empregando instrumentos de medição apropriados para caracterização elétrica do sistema. A eficiência energética foi determinada pela razão entre a potência transferida ao receptor e a potência fornecida ao transmissor, possibilitando avaliar o desempenho do sistema em diferentes configurações experimentais.

Para complementar a análise dos resultados experimentais, foi empregada uma abordagem de modelagem estatística multivariada. Considerou-se a eficiência energética como variável resposta e, como variáveis explicativas, fatores operacionais e ambientais potencialmente relacionados ao desempenho do sistema, incluindo distância entre transmissor e receptor, temperatura ambiente, umidade relativa do ar, interferência eletromagnética e presença de obstáculos físicos. Essa abordagem permitiu investigar a contribuição individual e conjunta dessas variáveis sobre a eficiência observada, fornecendo uma análise quantitativa dos fatores que influenciam o comportamento do sistema WPT.

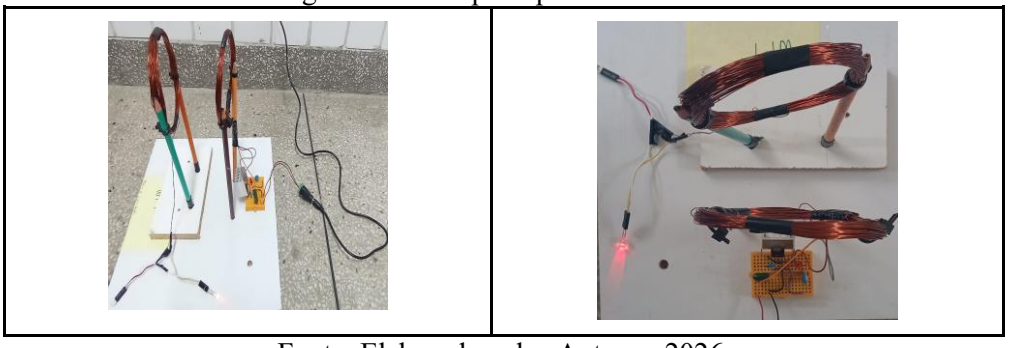
O tratamento estatístico dos dados foi realizado no ambiente computacional R, empregando técnicas de análise exploratória e ajuste de modelos de regressão múltipla para identificar tendências, quantificar relações entre as variáveis e apoiar a interpretação dos resultados experimentais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo desenvolvido permitiu avaliar experimentalmente o desempenho de um sistema de Transferência de Energia Sem Fio (Wireless Power Transfer – WPT) baseado no princípio do acoplamento indutivo ressonante. A montagem experimental possibilitou a aquisição de parâmetros elétricos fundamentais para a caracterização do sistema, fornecendo informações sobre tensão, frequência de operação, potência de entrada, potência de saída e eficiência energética.

A Figura 1 apresenta o protótipo construído, evidenciando os principais componentes do sistema: a bobina transmissora (primária) e a bobina receptora (secundária). As bobinas foram confeccionadas com fio de cobre esmaltado de 1 mm de diâmetro, contendo aproximadamente dez espiras cada, sendo posicionadas de forma a permitir a avaliação da transferência de potência em diferentes condições de operação.

Figura 1: Protótipo experimental WPT



Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

Para complementar a análise experimental, os dados obtidos foram submetidos à modelagem estatística multivariada, considerando a eficiência energética como variável resposta e fatores operacionais e ambientais, como distância entre as bobinas, temperatura ambiente, umidade relativa do

ar, interferência eletromagnética e presença de obstáculos físicos, como variáveis explicativas. Essa abordagem permitiu identificar tendências e avaliar quantitativamente a influência conjunta dessas variáveis sobre o desempenho do sistema.

As Tabelas 1 e 2 apresentam os principais resultados obtidos durante os ensaios experimentais. Foram registradas medições de tensão máxima, tensão mínima, tensão pico a pico, tensão eficaz (RMS), frequência de operação, potência de entrada e potência de saída, constituindo a base para a avaliação do comportamento elétrico do protótipo.

Tabela 1: Dados Experimentais do Protótipo WPT

Medição	Vmax (V)	Vmin (V)	Vpp (V)	Vtop (V)	Vbas (V)	Vamp (V)	Vavg (V)
1	10,4	-11,2	21,6	4,64	-10,7	20,5	0,308
2	1,76	-1,76	3,52	9,80	-1,76	3,52	-0,0315
3	1,76	-1,80	3,56	1,76	-1,80	3,56	-0,0273
4	2,04	-2,69	3,88	1,76	-1,80	—	—
5	2,16	-1,67	3,96	3,20	-10,7	—	—
6	4,32	-3,20	8,48	5,40	-1,76	—	—

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

Tabela 2: Dados Experimentais do Protótipo WPT

Medição	Vrms (V)	Vovr (%)	Vpre (%)	Prd (µs)	Freq (kHz)	Pin (W)	Pout (W)
1	7,33	2,20	2,20	18,60	53,76	404,4	7,8
2	1,22	0,00	0,00	8,50	117,60	—	—
3	1,22	1,10	1,10	8,40	119,00	—	—
4	—	—	—	—	120,70	—	—
5	—	—	—	—	120,90	—	—
6	—	—	—	—	118,60	—	—

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

Os resultados evidenciam uma eficiência energética global de aproximadamente 1,93%, indicando que apenas uma pequena parcela da potência fornecida ao transmissor foi efetivamente convertida em potência útil no receptor. Embora esse valor esteja abaixo dos níveis normalmente observados em sistemas WPT otimizados, ele é compatível com um protótipo experimental de baixo custo e demonstra a viabilidade da plataforma desenvolvida para fins de investigação e validação de modelos.

A reduzida eficiência observada pode ser atribuída a diferentes fatores inerentes ao sistema, entre eles o baixo coeficiente de acoplamento magnético entre as bobinas, perdas resistivas nos

enrolamentos, ausência de otimização dos circuitos de compensação ressonante e possíveis desalinhamentos entre transmissor e receptor durante os ensaios. Além disso, pequenas variações na frequência de operação e nas condições ambientais podem contribuir para a degradação do desempenho, conforme relatado na literatura para sistemas baseados em acoplamento indutivo ressonante.

As medições apresentadas nas Tabelas 1 e 2 também evidenciam variações significativas nos níveis de tensão e frequência entre os diferentes ensaios experimentais, indicando que o desempenho do sistema é sensível às condições de operação. Essas informações reforçam a importância da instrumentação do protótipo para a compreensão do comportamento elétrico do sistema e fornecem uma base consistente para estudos futuros de otimização.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a avaliação experimental de um protótipo de Transferência de Energia Sem Fio (Wireless Power Transfer – WPT) baseado em acoplamento indutivo ressonante, permitindo caracterizar seu desempenho por meio de medições de tensão, frequência e potência. Os resultados evidenciaram a influência das condições de operação sobre a eficiência energética, confirmando a importância do acoplamento entre as bobinas para o desempenho do sistema. A modelagem estatística mostrou-se uma ferramenta complementar para a organização e interpretação dos dados experimentais, contribuindo para a análise dos fatores que afetam a transferência de energia. Como perspectiva futura, pretende-se otimizar o protótipo e ampliar os ensaios experimentais, visando ao desenvolvimento de sistemas WPT mais eficientes e adequados às aplicações da eletrificação inteligente.

REFERÊNCIAS

HASAN, Md Mahabub et al. Environmental Effects on Wireless Power Transfer Efficiency: A Comprehensive Study. **IEEE Access,** v. 8, 2020.

JIANG, Xiao Qiang et al. An overview of resonant circuits for wireless power transfer. **Energies,** v. 10, n. 7, p. 894, 2017.

LI, Shan et al. Impact of Humidity and Temperature on Wireless Power Transfer Systems. **Journal of Power Sources,** v. 520, 2022.

KIM, Sampath et al. Coil design guidelines for high efficiency of wireless power transfer (WPT). In: **2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON).** IEEE, 2016. p. 726-729.

KUMAR, Amit et al. Operational Challenges in Wireless Power Transfer: A Statistical Perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 170, 2023.

TRIVIÑO, Alicia; GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, José M.; AGUADO, José A. Wireless power transfer technologies applied to electric vehicles: A review. **Energies,** v. 14, n. 6, p. 1547, 2021.

ZHANG, Yuan et al. Efficiency Optimization of Wireless Power Transfer Systems Under Misalignment Conditions. **IEEE Transactions on Power Electronics,** v. 36, n. 3, p. 3425-3436, 2021.