



Análise preliminar de sistemas de WPT frente a situações de desalinhamento.

Preliminary analysis of WPT systems against misalignment situations.

Gabriel Pitondo Rossini¹, Renan Carlos Petini², Lucas Ricken Garcia³

RESUMO

Nas últimas décadas, a popularização de dispositivos móveis e veículos elétricos impulsionou o interesse industrial, científico e comercial em métodos de transferência de energia sem fio, do inglês wireless power transfer (WPT). O presente trabalho analisou preliminarmente um sistema de WPT indutivo em ressonância frente a situações de desalinhamento lateral. Para tanto, foi validada uma metodologia de avaliação do comportamento do método observando apenas o desempenho do circuito fonte. Então, analisou-se sistema por três figuras de mérito: I^* , P^* e η . Os dados foram coletados com o auxílio de três eixos mecânicos e um osciloscópio controlados numericamente por um software desenvolvido em python. Devido a natureza simétrica das bobinas utilizadas, foi observado simetria na performance do sistema em relação ao desalinhamento lateral, reduzindo gradativamente o desempenho do sistema e formando um comportamento similar a um parabolóide de revolução.

PALAVRAS-CHAVE: desalinhamento lateral; transferência de energia sem fio; eficiência.

ABSTRACT

In recent decades, the popularization of mobile devices and electric vehicles has boosted interest industrial, scientific and commercial wireless power transfer methods transfer (WPT). The present work preliminarily analyzed an inductive WPT system in situations of lateral misalignment. To this end, a methodology for evaluating the behavior of the method was validated. observing only the performance of the source circuit. Then, the system was analyzed by three figures of merit: I^* , P^* and η . The data was collected with the aid of three controlled mechanical axes and an oscilloscope numerically by software developed in Python. Due to the symmetrical nature of the coils used, symmetry was observed in the performance of the system in relation to lateral misalignment, gradually reducing the performance of the system and forming a behavior similar to a paraboloid of revolution.

KEYWORDS: lateral misalignment; wireless power transfer; efficiency.

INTRODUÇÃO

Em meados do século XIX, o físico escocês James Clerk Maxwell unificou a descrição dos fenômenos elétricos e magnéticos sob a ótica do eletromagnetismo. Maxwell, em seu livro "A Treatise on Electricity and Magnetism", previu teoricamente a possibilidade de sistemas de transferência de energia sem fio (PETERSON, 2015). Entretanto, foi o cientista e inventor sérvio-americano Nikola

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil. E-mail: gabrielpitondo@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 7231320905290762.

² Bolsista do(a) ... (inserir nome da Agência de Fomento, se houver). Nome da Instituição por Extenso, Município, Estado, País. E-mail: renanpetini@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 2881737561322487.

³ Docente no Curso de Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil. E-mail: lucasgarcia@utfpr.edu.br. ID Lattes: 1085422040174691.



Tesla que popularizou a noção de WPT (wireless power transfer), quando, na década de 1880, propôs um circuito com bobinas em ressonância que explorava a natureza dos campos elétricos e magnéticos descritos por Maxwell (ZHONG; LEE; HUI, 2013).

Nas últimas décadas, fatores como a popularização de dispositivos móveis - sobretudo telefones celulares, laptops e implantes biomédicos -, veículos elétricos, e a barreira tecnológica enfrentada pelas baterias, despertaram novamente amplo interesse científico, comercial e industrial em sistemas de transferência de energia sem fio. Atualmente, sistemas de WPT encontram aplicações em diversas áreas, principalmente em processos de automação industrial, circuitos eletrônicos de instrumentação, sistemas de segurança, entre outros (COVIC; BOYS, 2013).

Dentre as várias técnicas de WPT, analisou-se a transmissão de energia por acoplamento indutivo. Uma característica inerente ao desenvolvimento de sistemas pela técnica citada é a sua grande dependência ao alinhamento. Observa-se que na literatura há um interesse elevado em compreender a influência de desalinhamentos laterais e angulares sob sistemas utilizando diferentes tipos de bobinas (KEDA et al., 2022) (FOTOPOULOU; FLYNN, 2011) (GAO et al., 2016), bem como o desenvolvimento de soluções que minimizam estas influências, tal qual a utilização de novos arranjos de bobinas (DARVISH; MEKHILEF; ILLIAS, 2021) (YUAN et al., 2022).

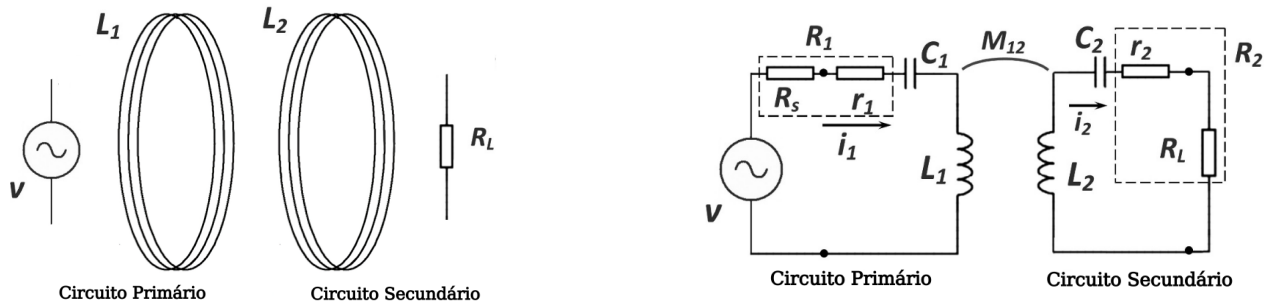
No sentido de contribuir para um melhor entendimento sobre a influência do posicionamento de enlases indutivos, o presente trabalho inicia uma investigação a respeito da influência de desalinhamentos laterais em enlases ressonantes utilizando bobinas circulares. Para realizar esta análise, um sistema de WPT de baixa escala foi projetado desde a concepção das bobinas, validado a partir de um modelo teórico e monitorado seu desempenho em termos de eficiência energética (η), capacidade de transferência de potência (P^*) e a razão entre a corrente no primário pela máxima corrente no primário (I^*).

PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DA PESQUISA

Foram utilizadas duas bobinas em ressonância operando a uma frequência de 300kHz . Fisicamente, o fluxo magnético criado pela corrente elétrica produzida na bobina geradora (circuito primário) é transmitido por meio do ar até a bobina receptora (circuito secundário), na qual uma tensão é induzida, como descrito pelas leis de Faraday e Lenz (ZHANG et al., 2019). A Figura 1 (a) representa uma visão abstrata do circuito analisado e a Figura 1 (b) o seu equivalente teórico. No equivalente teórico, R_s simboliza a resistência da fonte e r_1 e r_2 as resistências intrínsecas de L_1 e L_2 , respectivamente.

Em um primeiro momento, uma impressora 3D foi utilizada para produzir os carretéis para produção de duas bobinas L_1 e L_2 circulares de 20 milímetros de raio, 10 e 12 milímetros de espessura, respectivamente. Em seguida, enrolou-se em torno das bobinas fio de cobre de 0,142 milímetros de diâmetro (AWG 35). Além disso, foi adicionado um resistor de prova de 10Ω no lado transmissor. Em seguida, com uma ponte RLC Minipa MX1010 mensurou-se a resistência intrínseca e a indutância de cada bobina. O Quadro 1 expõe os dados coletados.

Figura 1 – Sistema de WPT via acoplamento indutivo



(a) Representação do primário (lado transmissor) e do secundário (lado da carga).

Fonte: Autoria própria (2023).

(b) Circuito equivalente de um sistema de WPT com duas bobinas.

Fonte: Adaptado de Garcia, Abatti (2021).

Quadro 1 – Dados das bobinas L_1 e L_2

Dado	L_1	L_2
Número de voltas	93	62
Raio	20 mm	20 mm
Espessura	12 mm	10 mm
Resistência intrínseca	19,2 Ω	8,2 Ω
Indutância	385,5 μH	206,4 μH

Fonte: Autoria própria (2023).

Sintonia de um Enlace Série-Série e sua Validação Experimental

Para maximizar a capacidade de transferência de potência do sistema, é necessário que o circuito primário e secundário estejam ambos em ressonância na mesma frequência (SADIKU; ALEXANDER, 2013). Isso significa que a impedância de ambos os circuitos devem ser puramente resistivas. Para tanto, utilizou-se uma rede de capacitores em série com a bobina, em ambos os circuitos. Como todos os elementos estão em série, obtém-se que $Z = R + j\omega L + 1/(j\omega C)$. Logo, como a parte imaginária de Z deve ser zero, $\omega L = 1/(\omega C)$. Assim, conclui-se que $C = 1/(\omega^2 L)$.

Desta forma, utilizando a última expressão, foi calculada a capacitância necessária para cada circuito. Para L_1 , $C_1 = 730,27$ pF e, para L_2 , $C_2 = 1363$ pF. Por conseguinte, verificou-se experimentalmente se as formas de onda de tensão medida no resistor de prova de cada circuito e na fonte estavam em fase. Esse efeito foi observado quando realizado ajustes finos alcançando os seguintes valores de capacitância: $C_1 = 668$ pF e $C_2 = 1240$ pF. Isto pode ter ocorrido devido às características não ideais dos componentes, condutores e circuito interno dos dispositivos utilizados.

Antes de verificar o comportamento do circuito a partir de alterações na distância entre as bobinas, realizou a validação do sistema projetado seguindo metodologia de medição utilizada em (GARCIA; ABATTI, 2022) e comparando resultados práticos e teóricos com modelo teórico implementado em MATLAB. Segundo (GARCIA; ABATTI, 2022), o desempenho de um sistema de WPT com duas bobinas pode ser descrito em termos de três figuras de mérito: I^* , P^* e η a partir das equações 1, 2 e 3. Além disso, descreve-se que o P^* e η pode ser determinado monitorando apenas

I^* .

$$I^* = \frac{i_1}{i_{1MAX}} \tag{1}$$

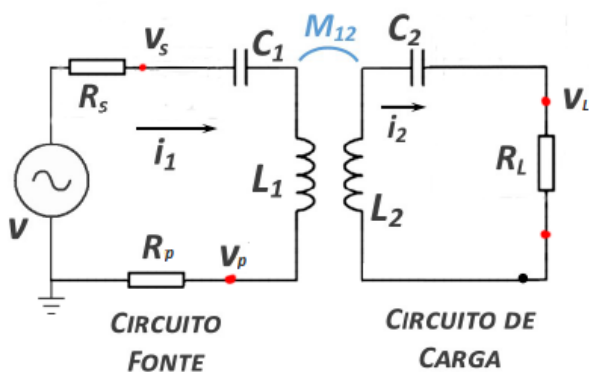
$$P^* = \frac{P_0}{P_{0MAX}} \tag{2}$$

$$\eta = 1 - I^* \tag{3}$$

Foi mensurada a tensão V_s , sem a conexão do circuito primário, ou seja, mensurando a tensão de entrada sem influência de alguma carga. Após este passo, conectou-se o circuito primário e mensurou-se a tensão V_p sem o acoplamento do circuito secundário. Desta forma, é possível definir o valor da corrente máxima no primário (i_{1max}) e posteriormente calcular I^* por meio da Equação 1

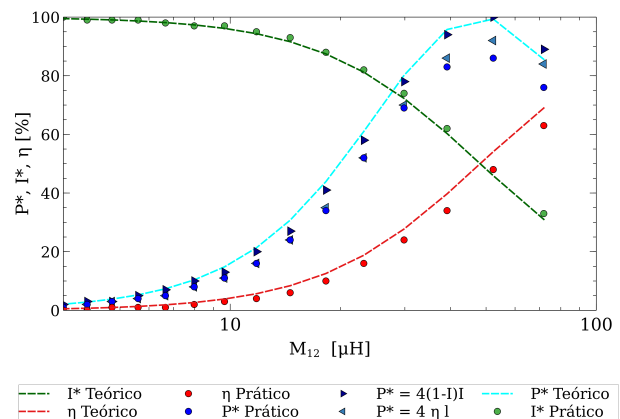
A Figura 2(a) apresenta os pontos em que ocorreram as medições. Para tanto, foram utilizados dois osciloscópios Tektronix TDS-2002B a fim de mensurar as tensões e um gerador de funções Minipa MFG4201A como fonte geradora.

Figura 2 – Sistema de WPT via acoplamento indutivo



(a) Pontos onde as tensões foram medidas.

Fonte: Adaptado de Garcia, Abatti (2021).



(b) Validação do enlace Serie-Serie.

Fonte: Autoria própria (2023).

Para este processo de validação, o sistema de WPT foi monitorando em uma condição de perfeito alinhamento, começando com uma distância de 4 mm e aumentando com passo de 4 mm até 60 mm. O resultado do processo de validação pode ser observado na Figura 2(b), em que são apresentados os valores teóricos de I^* , P^* e η

Na Figura 3 (b), é possível observar que a teoria e a prática estão em consonância. Além disso, o desvio entre as curvas práticas e teóricas na Figura 3 (b) pode ser explicado devido as imperfeições e tolerâncias dos componentes utilizados.

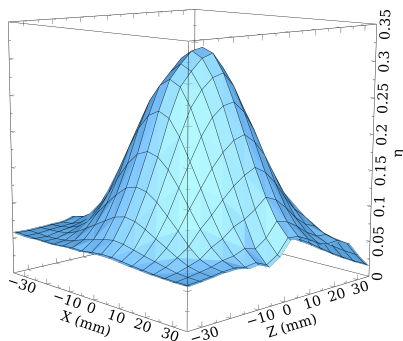
Uma vez que a metodologia demonstrada em (GARCIA; ABATTI, 2022) já foi validada, para fins de observar o comportamento do sistema frente a situações de desalinhamento lateral, mensurou-se i_1 com as bobinas em diversas posições. Foram utilizados três eixos moveis controlados numericamente através de um computador para posicionar as bobinas de maneira precisa e automática, a fim de observar o comportamento do sistema. A partir da posição de alinhamento com o circuito de carga

afastado em 12 mm do circuito secundário, o primário foi movimentado ao longo do eixo X, de -30 mm até 30 mm com um passo de 4 mm. Então, para cada posição de desalinhamento no eixo X, o eixo Z foi variado de -30 mm até 30 mm com passo de 4 mm. A tensão sobre o resistor de prova no circuito primário foi mensurada para cada posição.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

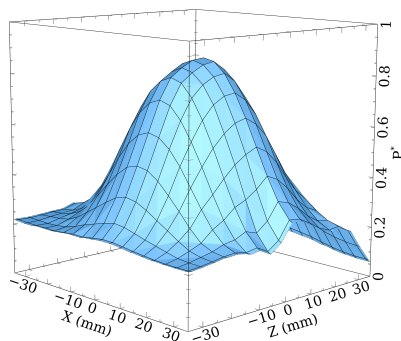
No atual estágio da pesquisa, um sistema de WPT Série-Série foi projetado e validado e iniciou-se os primeiros estágios de observação do comportamento do sistema frente a desalinhamento laterais. Neste sentido, aplicando a metodologia descrita na seção anterior, observa-se na Figura 3 que, devido a natureza simétrica do sistema, as figuras de mérito P^* , η e I^* estão muito próximas de um paraboloides de revolução. Esse fato pode ser explicado pela natureza parabólica dos sinais, como pode ser comprovado através da Figura 2 (b). Além disso, é válido destacar que o sistema apresenta um baixa eficiência devido ao deslocamento inicial de 12 mm da carga em relação ao circuito fonte.

Figura 3 – Comportamento de um sistema de WPT desalinhado lateralmente



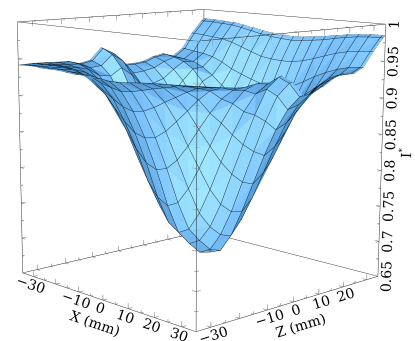
(a) Eficiência.

Fonte: Autoria própria (2023).



(b) Potência normalizada.

Fonte: Autoria própria (2023).



(c) Figura de mérito

Fonte: Autoria própria (2023).

CONCLUSÕES

O presente trabalho iniciou uma análise dos efeitos causados pelo desalinhamento lateral em sistemas de WPT indutivos. É importante destacar que ainda existem ruídos no processo de aquisição de dados, que podem ser diminuídos utilizando equipamentos de maior precisão, principalmente quanto ao posicionamento das bobinas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por possibilitar o desenvolvimento deste trabalho.



CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- COVIC, Grant Anthony; BOYS, John Talbot. Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, IEEE, v. 1, p. 28–41, 2013.
- DARVISH, Peyman; MEKHILEF, Saad; ILLIAS, Hazlee Azil Bin. A Novel S–S–LCLCC Compensation for Three-Coil WPT to Improve Misalignment and Energy Efficiency Stiffness of Wireless Charging System. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 36, n. 2, p. 1341–1355, 2021.
- FOTOPOULOU, Kyriaki; FLYNN, Brian W. Wireless Power Transfer in Loosely Coupled Links: Coil Misalignment Model. **IEEE Transactions on Magnetics**, IEEE, v. 47, n. 2, p. 416–430, 2011.
- GAO, Yabiao et al. **2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**: Misalignment effect on efficiency of wireless power transfer for electric vehicles. Long Beach, CA, EUA: [s.n.], 2016. P. 3526–3528.
- GARCIA, Lucas Ricken; ABATTI, Paulo José. A simple method to determine the performance of two-coil wireless power transfer systems without direct output measurement. **International Journal of Electronics**, Taylor & Francis, v. 109, p. 1461–1472, 2022.
- KEDA, Yutaro et al. **2021 51st European Microwave Conference (EuMC)**: Stacked Metasurfaces for Misalignment Improvement of WPT System Using Spiral Resonators. 1. ed. Londres, Reino Unido: [s.n.], 2022.
- PETERSON, Gary. **2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)**: The application of electromagnetic surface waves to wireless energy transfer. 1. ed. Boulder, CO, EUA: [s.n.], 2015.
- SADIKU, Matthew N; ALEXANDER, Charles K. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. Porto Alegre: [s.n.], 2013. P. 419–426.
- YUAN, Zhaoyang et al. A Misalignment Tolerant Design for a Dual-Coupled LCC-S-Compensated WPT System With Load-Independent CC Output. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 37, n. 6, p. 7480–7492, 2022.
- ZHANG, Zhen et al. Wireless Power Transfer—An Overview. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 66, p. 1044–1058, 2019.
- ZHONG, Wenxing; LEE, Chi Kwan; HUI, S. Y. Ron. General Analysis on the Use of Tesla's Resonators in Domino Forms for Wireless Power Transfer. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 60, p. 261–270, 2013.