

# ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO COM TOPOLOGIA SÉRIE-SÉRIE PARA APLICAÇÕES DE ALTO RENDIMENTO

GRATEKI, V.<sup>1</sup>; SOUZA, W. S.<sup>1</sup>; DIAS, L. G.<sup>1</sup>; MARTINS, G. D.<sup>1</sup>; OLIVEIRA, E. H. S.<sup>1</sup>; GODOY, R. B.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo PET - Elétrica, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Cidade Universitária, vitor.grateki@ufms.br, pet.eletrica.ufms@gmail.com;

<sup>2</sup>Tutor do Grupo PET - Elétrica, UFMS, Cidade Universitária

**RESUMO:** Neste artigo, é feito o estudo de um sistema de Transferência de Energia Sem Fio (WPT) utilizando a topologia Série-Série (SS), que permite o acoplamento ressonante entre capacitores e indutores em série nos circuitos primário e secundário. A metodologia inclui simulações com MATLAB-Simulink® para modelagem elétrica, Proteus® para layout de circuitos e Ansys Maxwell® para simulações magnéticas, variando parâmetros como frequências e valores de componentes. A potência de saída nominal planejada para o circuito é de 500 W e a análise de quatro sistemas revelou que o sistema operando a 50 kHz foi o mais atrativo para a implementação. Entretanto, com base na geometria da bobina adotada, simulações magnéticas indicaram uma forte redução no fator de acoplamento em relação ao valor inicialmente considerado. Tal resultado levou à necessidade de reduzir a tensão de operação com o objetivo de preservar a integridade do sistema. Mesmo com essa adaptação, as simulações apresentaram resultados promissores, com rendimento superior a 96%.

**Palavras-chave:** Micromobilidade; Carregamento Sem Fio; Acoplamento Indutivo; Circuitos Ressonantes.

## ANALYSIS AND SIMULATION OF A WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM WITH SERIES-SERIES TOPOLOGY FOR HIGH EFFICIENCY APPLICATIONS

**ABSTRACT:** This paper studies a Wireless Power Transfer (WPT) system using the Series-Series (SS) topology, which allows resonant coupling between capacitors and inductors in series in the primary and secondary circuits. The methodology includes simulations with MATLAB-Simulink® for electrical modeling, Proteus® for circuit layout, and Ansys Maxwell® for magnetic simulations, varying parameters such as frequencies and component values. The output nominal power intended for the proposed system is 500 W and the analysis of four systems revealed that the system operating at 50 kHz was the most attractive for implementation. However, based on the adopted coil geometry, magnetic simulations indicated a significant reduction in the coupling factor compared to the initially considered value. This result led to the need to reduce the operating voltage to preserve the system's integrity. Even with this adjustment, the simulations presented promising results, with efficiency above 96%.

**Keywords:** Micromobility; Wireless Charging; Inductive Coupling; Resonant Circuits.

### 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço dos componentes eletrônicos, o desenvolvimento dos interruptores de alta frequência (Mosfets) nos anos 80 possibilitou uma maior transferência de potência em

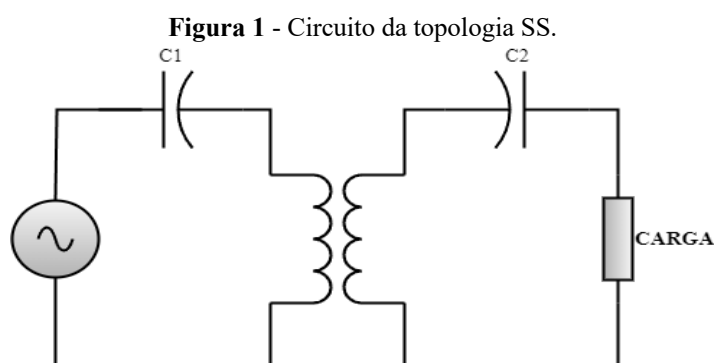
aplicações de Transferência de Energia Sem Fio (WPT, Wireless Power Transfer), tornando essa tecnologia promissora para diversas áreas, como carregamento de baterias, eletrônicos portáteis e mobilidade elétrica. Recentemente, a micromobilidade se consolidou devido ao avanço de tecnologias e baterias, permitindo o uso de veículos elétricos leves, como bicicletas elétricas [1]. Com isso, cresce a demanda por soluções eficazes de carregamento, sendo o carregamento wireless uma alternativa promissora para transformar a forma como esses veículos são recarregados.

Voltado à micromobilidade elétrica, o carregamento sem fio traz benefícios operacionais, eliminando os riscos do carregamento tradicional, como contatos diretos e danos à infraestrutura devido ao clima ou vandalismo [2]. Entre as vantagens destacam-se: a eliminação de choques elétricos entre transmissor e receptor, redução do desgaste físico dos dispositivos, aumento da vida útil das baterias e facilidade de uso para o consumidor final. Além disso, a integração desse sistema em ambientes urbanos oferece uma estética mais limpa e harmonizada.

Nesse sentido, este trabalho apresenta conceitos técnicos pertinentes para o dimensionamento de carregadores de bateria sem fio de alto rendimento [3]. O trabalho consiste no dimensionamento de um circuito para a transmissão utilizando acoplamento indutivo ressonante entre as bobinas transmissora e receptora. O desempenho da transmissão é avaliado para a frequência de 50 kHz, na topologia de compensação Série-Série (SS). O objetivo final é a implementação, teste e validação do sistema, posteriormente aplicados em carregadores sem fio para bicicletas elétricas dentro da universidade. O sistema projetado visa resolver um dos problemas da transferência de energia sem fio, que é a eficiência na transmissão, com resultados esperados de eficiência acima de 96%.

## 2. METODOLOGIA

Para a implementação do circuito, foi utilizada a compensação SS (Série-Série). Como se observa na Figura 1, essa topologia consiste na ressonância série dos componentes primários  $C_1$  e  $L_1$  e, do mesmo modo, na ressonância série dos elementos secundários  $C_2$  e  $L_2$ .



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Foram realizadas simulações com diferentes parâmetros, cujos resultados de rendimento e potência de saída podem ser observados na Tabela 1. Conforme se observa na Tabela 1, todos os sistemas apresentam bom rendimento e atingem a potência nominal planejada de 500 W. Contudo, com base em parâmetros como esforços de tensão e corrente nos bancos capacitivos e o rendimento global do sistema, selecionou-se o "Sistema 3" para implementação. As correntes nos elementos indutivos foram utilizadas para a simulação do circuito magnético. De acordo com as restrições geométricas impostas pela aplicação do sistema, foram selecionadas bobinas em formato cilíndrico (solenoides), conforme Figura 2.

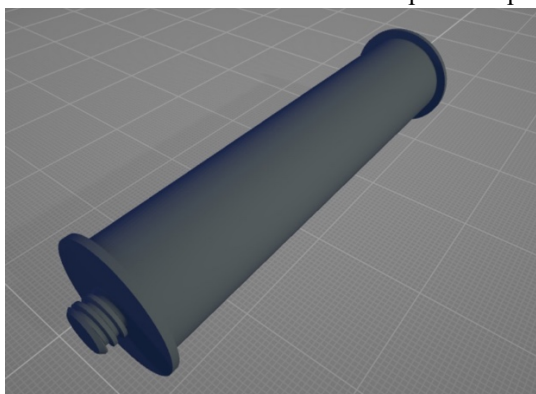
Durante o desenvolvimento do projeto, foram realizadas simulações nos softwares MATLAB-Simulink® para determinar os parâmetros, plotar gráficos e simular o circuito elétrico; Proteus® para modelagem das placas de circuito impresso dos bancos de capacitores; Ansys Maxwell® para simular o circuito magnético; e Solid Edge® e Ultimaker Cura® para modelagem 3D e fatiamento das peças que compõem os carretéis das bobinas.

**TABELA 1-** Parâmetros das simulações.

	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Frequência (kHz)	30	50	50	100
f. acop. esperado	0,25	0,25	0,50	0,25
V fonte (V)	100	100	100	75
L1( $\mu$ H)	400	400	200	100
L2( $\mu$ H)	50	20	10	10
r1( $\Omega$ )	0,4	0,4	0,2	0,1
r2( $\Omega$ )	0,1	0,1	0,05	0,05
Rendimento (%)	93,8	93,7	96,7	95,3
Potência de saída (W)	557,4	503,2	514,6	574,8

Fonte: Elaborado pelos autores.

**Figura 2** – Projeto de carretel de 23 cm a ser utilizado para composição das bobinas.

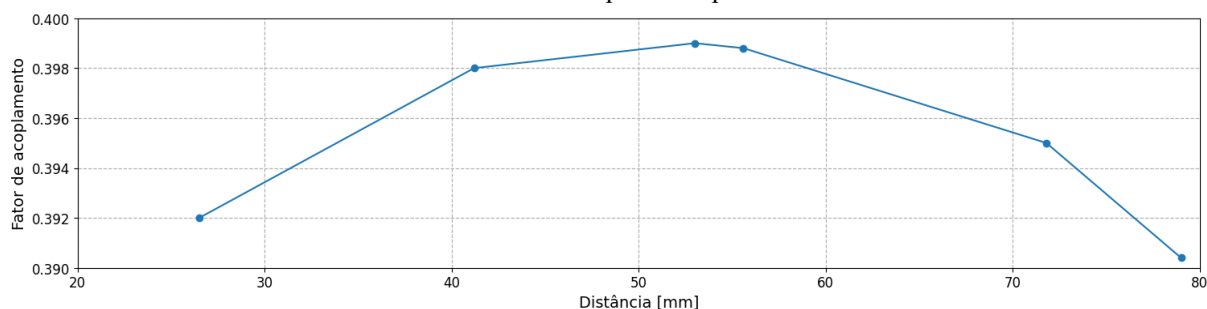


Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma vez que a geometria das bobinas foi definida, realizou-se o estudo de acoplamento magnético entre elas. O sistema físico foi desenvolvido de modo que a bobina de menor diâmetro pudesse se encaixar no interior da bobina de maior diâmetro. Como mostra o Gráfico 1, o valor do fator de acoplamento para as bobinas encaixadas ficou em aproximadamente 0,39. Apesar da redução do fator de acoplamento em relação ao valor previamente estipulado, observou-se forte estabilidade frente aos desalinhamentos entre as bobinas, um fator muito relevante para sistemas de transferência sem fio. Contudo, a mudança no fator de acoplamento resultou no aumento da corrente em ambos os acoplamentos. Conseqüentemente, o aumento das correntes ocasionaria mudança no dimensionamento dos condutores das bobinas, portanto, conforme Tabela 2, reduziu-se o valor da fonte de tensão para 80 V, mantendo-se assim o projeto original das bobinas.

Gráfico 1 - Fator de acoplamento pela distância.



Fonte: Elaborado pelos autores.

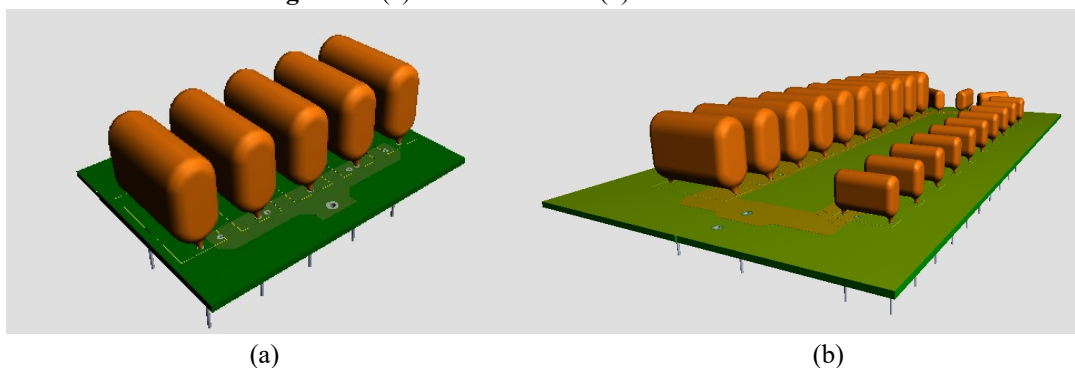
TABELA 2 - Correntes no primário e secundário em função do fator de acoplamento e da fonte de tensão.

V fonte (V)	Fator de Acoplamento	Corrente Primária (A)	Corrente Secundária (A)	Potência de Saída (W)
100	0,5	5,31	14,08	514,6
100	0,39	8,28	17,92	834,5
80	0,39	6,95	14,33	534,1
75	0,39	6,52	13,43	469
70	0,39	6,08	12,53	408,4

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em seguida, conforme Figura 3, foram elaboradas as placas de circuito impresso para compor os bancos de capacitores: o banco primário de 50 nF foi composto por 5 capacitores de 10 nF em paralelo; o banco secundário, com capacidade de 1,075  $\mu$ F, foi projetado com 13 capacitores de 75 nF e 10 capacitores de 10 nF, todos em paralelo.

Figura 3 - (a) Banco Primário. (b) Banco Secundário

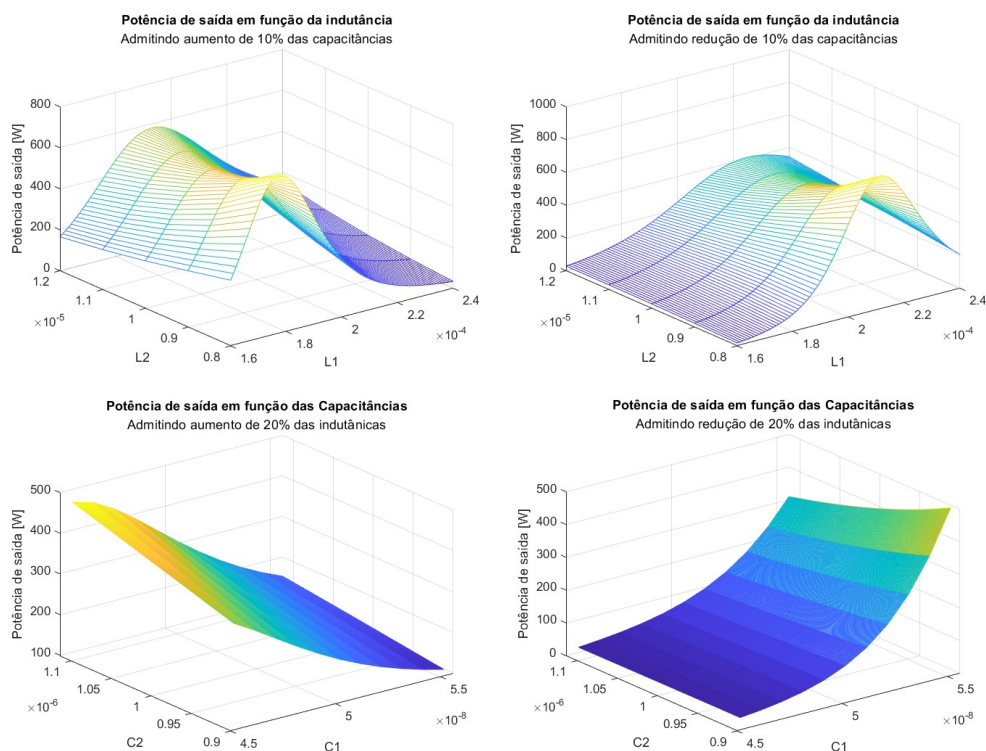


Fonte: Elaborado pelos autores.

Para validar os requisitos do projeto, foram plotados gráficos tridimensionais com o intuito de analisar os possíveis valores da potência de saída em função das variações construtivas dos bancos de capacitores e das indutâncias das bobinas. Foram consideradas variações de 10% nas capacitâncias e 20% nas indutâncias, conforme ilustrado na Figura 4.

Na análise dos gráficos da Figura 4, observa-se que a potência de saída é muito sensível às variações dos elementos ressonantes  $C_1$  e  $L_1$ . Portanto, torna-se muito importante garantir a que o conjunto ressonante do primário esteja bem dimensionado. Vale ressaltar que, uma vez que as curvas não apresentam cristas ou vales muito acentuados em função das variações paramétricas, conclui-se que a topologia SS projetada está livre do fenômeno de múltiplas ressonâncias.

Figura 4 - Análise da potência de saída para diferentes combinações de  $L_1, L_2, C_1$  e  $C_2$



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados de simulação demonstraram muita robustez para o sistema proposto, garantindo que a implementação física do sistema tende a alcançar resultados experimentais muito satisfatórios. No estágio atual, os bancos capacitivos e os carretéis para comporem as bobinas já foram projetados e implementados. Os bancos capacitivos foram analisados em um amplo espectro de frequência (1 Hz a 300 kHz), apresentando resultados bastante satisfatórios. A partir da implementação das bobinas, pretende-se levantar resultados experimentais a fim de verificar a real viabilidade do sistema proposto. Futuramente, espera-se implementar outras unidades deste sistema para atuarem como carregadores sem fio para bicicletas elétricas. Almeja-se com isso facilitar o uso da micromobilidade no ambiente acadêmico ao passo que possam ser vivenciadas as vantagens do carregamento sem fio. Em linhas gerais, a integração dessas soluções inovadoras oferece benefícios significativos para a mobilidade urbana, reduzindo o impacto ambiental e melhorando a qualidade de vida dos usuários.

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1] FERRÃO, Ana Filipa Trindade. O papel da micro-mobilidade nos transportes urbanos do futuro. 2020. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, 2020.[1]
- [2] MOREIRA, Ricardo Santarém. Modelização e Análise de Sistemas de Carregamento Wireless. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletromecânica) – Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2023.
- [3] D. Pradeep Kumar Reddy and J. Mohana, Wireless power transfer: Between Distance and Efficiency, vol. 8, no. 4. 2016.