



## Análise de circuitos ressonantes aplicados à transferência de energia sem fio

### Analysis of resonant circuits applied to wireless power transfer

Renan Carlos Petini<sup>1</sup>, Gabriel Pitondo Rossini<sup>2</sup>, Lucas Ricken Garcia<sup>3</sup>

#### RESUMO

Um sistema de transferência de energia sem fio se trata de dois ou mais circuitos ressonantes, contendo um circuito primário (fonte) e um circuito secundário (carga), onde o objetivo se trata de transferir o máximo de potência ao secundário ou obter a máxima eficiência neste processo de transferência. Esta tecnologia está cada vez mais presente na vida das pessoas à medida que se aumenta a comercialização de aparelhos celulares com carregamento sem fio e veículos elétricos com estações de carregamento sem fio. Contudo, existem várias topologias de circuitos que podem ser utilizadas para que haja um enlace ressonante, sendo assim, a pesquisa possui como objetivo apresentar as topologias série-série (SS) e série-paralelo (SP), realizando a análise teórica e validando-a com experimentos práticos e objetivos. No atual estágio de desenvolvimento observou-se que os experimentos realizados validam a análise teórica e que o uso de uma topologia SP gera algumas limitações em relação ao valor da carga, o qual não se observa para uma topologia SS.

**PALAVRAS-CHAVE:** ressonância; série-série; série-paralelo; transferência de energia sem fio.

#### ABSTRACT

A wireless power transfer system consists of two or more resonant circuits, containing a primary circuit (source) and a secondary circuit (load), where the objective is to transfer the maximum power to the secondary or obtain maximum efficiency in this transfer process. This technology is increasingly present in people's lives as the sale of cell phones with wireless charging and electric vehicles with wireless charging stations increases. However, there are several circuit topologies that can be used to create a resonant link, therefore, the research aims to present the series-series (SS) and series-parallel (SP) topologies, carrying out theoretical analysis and validating them with practical and objective experiments. At the current stage of development, it was observed that the experiments carried out validate the theoretical analysis and that the use of an SP topology generates some limitations in relation to the load value, which is not observed for an SS topology.

**KEYWORDS:** resonance; series-series; series-parallel; wireless power transfer.

## INTRODUÇÃO

A transferência de energia sem fio (WPT) tem sido uma das tecnologias mais exploradas das últimas décadas, pois com o avanço cada vez maior do uso de aparelhos celulares, dispositivos biomédicos e veículos elétricos, as baterias estão chegando a um certo limiar de duração. Deste modo, o uso da WPT é essencial para que haja um melhor aproveitamento destes equipamentos, devido sua acessibilidade e segurança (ZHANG *et al.*, 2019).

Entretanto, por mais que o uso da WPT tenha sido mais reconhecida nas últimas décadas, foi desenvolvida a mais de um século por Nikola Tesla durante seus experimentos

<sup>1</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil. E-mail: renanpetini@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 2881737561322487.

<sup>2</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil. E-mail: gabrielpitondo@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 7231320905290762.

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

com acoplamentos magnéticos entre duas ou mais bobinas, fazendo o uso de corrente alternada (CA) para variar o campo magnético produzido (HUI; ZHONG; LEE, 2014).

Já nos primeiros experimentos para WPT utilizando indução eletromagnética, as bobinas utilizavam em grande parte uma compensação capacitiva, devido ao baixo coeficiente de acoplamento e a indutância de vazamento, assim aumentando significativamente sua eficiência. Isto se dá, uma vez que a fim de atingir o estado de ressonância entre as bobinas deve ser introduzido um capacitor de compensação externamente em série ou paralelo ao lado do primário e o secundário. Na literatura esta compensação é denominada como um sistema WPT de acoplamento de ressonância magnética (MRC), possuindo vários tipos de topologias, dentre elas as mais comuns são série-série (SS), série-paralelo (SP) e paralelo-paralelo (PP) (AHIRE; GOND; CHOPAIDE, 2022).

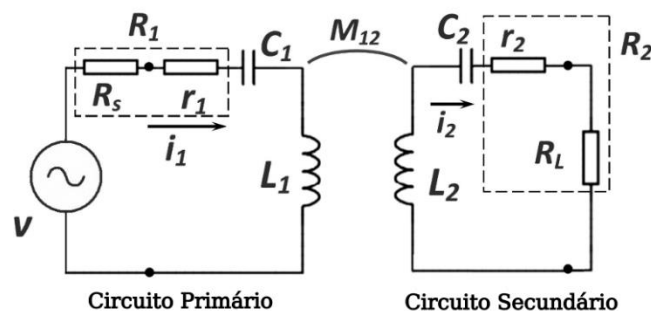
Alguns trabalhos tem buscado comparar o uso de diferentes topologias de compensação capacitiva em relação à distância de operação, eficiência energética e potência máxima como em Shevchenko *et al.* (2019) e Ricken Garcia e Abatti (2022).

Portanto o presente projeto terá como intuito efetuar o desenvolvimento de um enlace indutivo ressonante entre duas bobinas, efetuando a análise e atribuição de dados comparando as diferenças entres os tipos de topologias (SS e SP), assim avaliando as influências do circuito primário com o circuito secundário.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O enlace entre duas bobinas é realizado conforme a Figura 1, de modo que exista uma máxima transferência de potência entre o circuito primário e o secundário, ou ainda, circuito fonte e circuito de carga. Contudo, para uma validação posterior de um enlace deve-se considerar todas as variáveis existentes, onde  $R_1$  e  $R_2$  são respectivamente as resistências totais do circuito primário e secundário. Para o primário,  $R_s$  corresponde à resistência interna da fonte e  $r_1$  à resistência intrínseca de  $L_1$ ; no secundário,  $R_L$  corresponde à resistência de carga e  $r_2$  à resistência intrínseca de  $L_2$ .  $L_1$  e  $L_2$  as indutâncias de cada bobina e por fim  $C_1$  e  $C_2$ , que são as capacitâncias dimensionadas a fim de se obter uma ressonância magnética entre o primário e o secundário, determinada por uma frequência escolhida no projeto, assim criando um circuito resistivo, indutivo e capacitivo (RLC).

Figura 1 - Topologia generalizada para o enlace entre duas bobinas



Fonte: Adaptado de Garcia e Abatti (2022).

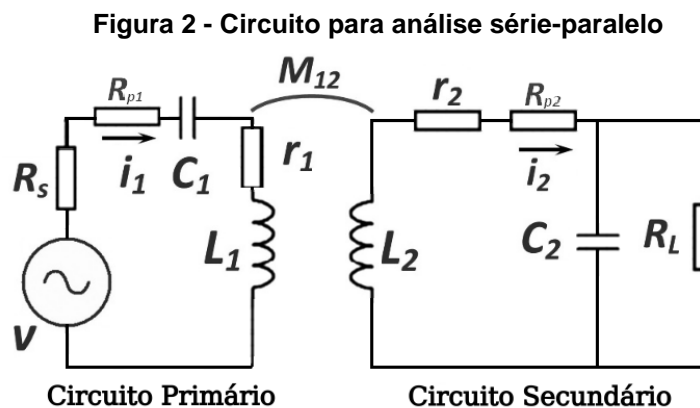
## Metodologia para um enlace Série-Série (SS)

Esta topologia se trata do mesmo circuito apresentado na Figura 1, onde tanto o circuito primário quanto o circuito secundário possuem seus componentes em série. Portanto, para a análise deste circuito foi utilizado o método de equação por malhas como demonstrado em (1), contudo como se trata de um circuito ressonante onde as componentes complexas se anulam assim facilitando os cálculos.

$$\begin{cases} V_s = [R_1 + j(-\frac{1}{\omega C_1} + \omega L_1)] * i_1 \pm j\omega M_{12} * i_2 \\ 0 = \pm j\omega M_{12} * i_1 + [R_2 + j(-\frac{1}{\omega C_2} + \omega L_2)] * i_2 \end{cases} \quad (1)$$

## Metodologia para um enlace Série-Paralelo (SP)

Para a topologia SP foi realizada uma análise para um circuito, como representado na Figura 2, em que a capacitância agora está em paralelo com a resistência de carga. Isto implica que para um monitoramento completo do secundário é necessária a adição de uma resistência de prova no secundário, já que agora a corrente  $i_2$  irá se dividir no nó entre o capacitor e a resistência de carga.



Fonte: Autoria Própria (2023).

A partir da análise de circuitos elétricos, buscou-se determinar a impedância total e a equivalência de um circuito paralelo para um circuito série. Desta forma, a metodologia utilizada foi converter o circuito SP da Figura 2 em um circuito equivalente ao circuito SS da Figura 1. Logo, pode-se determinar as resistências e capacitâncias equivalentes que seriam aplicáveis às equações de um sistema de WPT-SS.

A impedância total do circuito secundário corresponde a:

$$Z_T = (R_L \parallel C_2) + L_2 + r_2 + R_{p2} \quad (2)$$

efetuando as devidas simplificações,

$$ZT = \frac{\frac{1}{R_L} - j\omega C_2}{\left( (\omega C_2)^2 + \left( \frac{1}{R_L} \right)^2 \right)} + j\omega L_2 + r_2 + R_{p2} \quad (3)$$

O próximo passo realizado foi isolar as variáveis desejadas (no caso, parte real e imaginária) a fim de se conseguir a capacitância necessária para atingir a ressonância, assim obtendo a seguinte expressão de segundo grau,

$$L_2\omega^2(C_2)^2 - C_2 + \frac{L_2}{(R_L)^2} = 0 \quad (4)$$

aplicando método de resolução de sistemas de segunda ordem, tem-se que

$$C_2 = \frac{1 \pm \sqrt{1 - \frac{4(L_2)^2\omega^2}{(R_L)^2}}}{2L_2\omega^2} \quad (5)$$

em que a condição de existência e validade se trata da seguinte expressão:

$$R_L > 2L_2\omega. \quad (6)$$

Observa-se, portanto, que para um circuito SP a resistência total do secundário ( $R_2$ ) corresponde a  $R_2 = R_L + r_2 + R_{p2}$ , o valor de  $C_2$  que deve ser utilizado para o cálculo da ressonância deve ser o apresentado em (5) e, além disso, para que este sistema seja fisicamente realizável nas condições analisadas,  $R_L$  deve atender a expressão condicional definida em (6). Esta análise teórica indica que um sistema SS pode operar em condição de ressonância com valores reduzidos de  $R_L$ , porém, um sistema SP a resistência de carga depende dos valores de  $L_2$  e  $\omega$ , o que, para valores práticos, indica valores de  $R_L$  superiores.

### VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DAS TOPOLOGIAS SS e SP

Para verificar a validade das análises teóricas apresentadas na seção anterior, foram realizados experimentos com dois sistemas de WPT (SS e SP) utilizando um mesmo par de bobinas. O primeiro passo neste processo de validação foi a confecção das bobinas, posteriormente, a sintonia dos sistemas, e por fim, o monitoramento do desempenho modificando as distâncias entre as bobinas posicionadas de forma perfeitamente alinhadas (ou seja, sem desalinhamentos laterais ou angulares).

O processo empírico teve como apoio um gerador de funções Minipa MFG4201A, dois osciloscópios Tektronix TDS2002B e Ponte RLC Minipa MX1010. Para realizar a



movimentação das bobinas, utilizou-se um aparato de movimentação tridimensional (uma impressora 3D Anet adaptada) disponível no laboratório de pesquisa da Engenharia Eletrônica.

Para validação, utilizou-se modelo teórico baseado nas equações de Neumann para o cálculo da indutância mútua de duas bobinas circulares por Soma, Galbraith e White (1987), e expressões de  $\eta$ ,  $P^*$  e  $I^*$  descritas por Garcia e Abatti (2022), para determinação do desempenho destes sistemas. Este modelo teórico foi implementado em MATLAB em conjunto com as análises descritas na seção anterior.

### Confecção das bobinas

Para a confecção das bobinas  $L_1$  e  $L_2$ , foi utilizado uma impressora 3D disponibilizada pelo DAELN, onde suas dimensões respectivamente foram definidas por 4 cm de diâmetro e 1 cm de espessura, onde foram adicionadas 62 voltas de um fio de cobre esmaltado com 0,142 mm de raio.

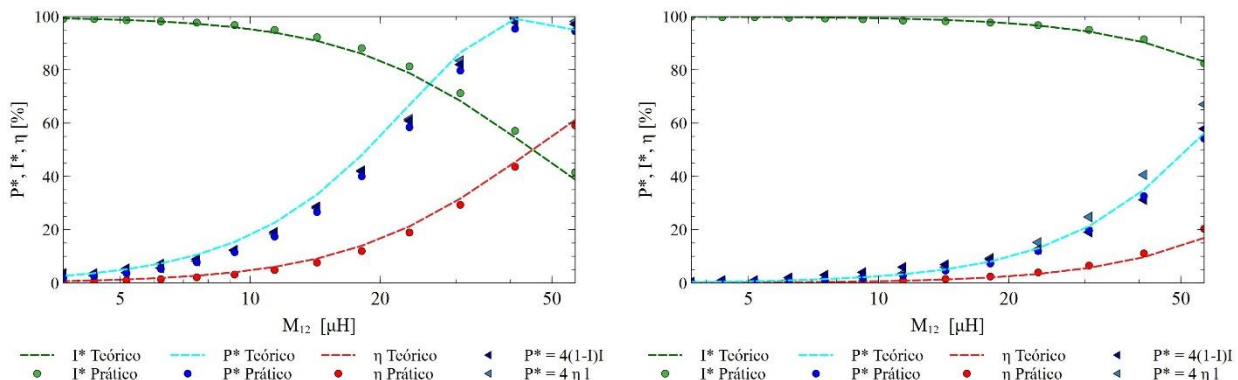
### Enlace série-série

A validação desta topologia está definida pela Figura 3, utilizando o aparato para definir o distanciamento entre as bobinas, que partiram de 0 mm e foram até 52 mm com passos de 4 mm. Logo, seus parâmetros foram definidos por  $V_S = 1,71V_{rms}$ ;  $R_S = 50\Omega$ ;  $r_1 = 7,8\Omega$ ;  $R_{p1} = 10,04\Omega$ ;  $r_2 = 7,96\Omega$ ;  $R_L = 98,43\Omega$  com uma compensação capacitiva definida por,  $C_1 = 1236,2pF$  e  $C_2 = 1230pF$  e os valores para a indutâncias das bobinas são  $L_1 = 206,1\mu H$  e  $L_2 = 205\mu H$ .

### Enlace série-paralelo

Todavia, para validação desta topologia foi necessário adicionar uma resistência de prova como já mencionada anteriormente, podendo ser visualizada na figura 3, onde seus parâmetros foram  $V_S = 2,99V_{rms}$ ;  $R_S = 48\Omega$ ;  $r_1 = 7,8\Omega$ ;  $R_{p1} = 9,92\Omega$ ;  $R_{p2} = 10\Omega$ ;  $r_2 = 7,96\Omega$ ;  $R_L = 1052\Omega$  com uma compensação capacitiva definida por,  $C_1 = 1236,2pF$  e  $C_2 = 1030pF$  e os valores para a indutâncias das bobinas são  $L_1 = 206,1\mu H$  e  $L_2 = 205\mu H$ .

Figura 3 - Desempenho em termos de  $P^*$ ,  $I^*$  e  $\eta$  para um sistema de a) WPT-SS e b) WPT-SP.



Fonte: Autoria Própria (2023).



## CONCLUSÃO

O presente trabalho traz a implementação de duas topologias presentes em sistemas de transferência de energia sem fio, série-série (SS) e série-paralelo (SP). Dada as topologias implementadas, verificou-se que a SS além de ser um circuito mais simples, não possui limitações para o valor da carga, diferente da topologia SP.

## Agradecimentos

Agradeço à UTFPR-CM por disponibilizar sua infraestrutura para o desenvolvimento deste trabalho.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

HUI, S. Y. R.; ZHONG, W.; LEE, C. K. A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer. **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 29, no. 9, pp. 4500-4511, setembro de 2014. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2249670.

CHOI, Byungcho; NHO, Jaehyun; CHA, Honnyong; AHN, Taeyoung; CHOI, Seungwon. Design and implementation of low-profile contactless battery charger using planar printed circuit board windings as energy transfer device. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 51, no. 1, pp. 140-147, fevereiro de 2004. DOI: 10.1109/TIE.2003.822039.

ZHANG, Z.; PANG, H.; GEORGIADIS, A.; CECATI, C. Wireless Power Transfer—An Overview. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 66, no. 2, pp. 1044-1058, fevereiro de 2019. DOI: 10.1109/TIE.2018.2835378.

SHEVCHENKO, V.; HUSEV, O.; STRZELECKI, R.; PAKHALIUK, B.; POLIAKOV, N.; STRZELECKA, N. Compensation Topologies in IPT Systems: Standards, Requirements, Classification, Analysis, Comparison and Application. **IEEE Access**, vol. 7, pp. 120559-120580, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2937891.

ROSLAN, Muhammad; NANDA, Nadia; YUSOFF, Siti. Series-series and series-parallel compensation topologies for dynamic wireless charging. **IJUM Engineering Journal**, vol. 22, pp. 199-209, 2021. DOI: 10.31436/iiumej.v22i2.1660.

AHIRE, D.B.; GOND, Vitthal J.; CHOPADE, Jayant J. Compensation Topologies for Wireless Power Transmission System in Medical Implant Applications: A Review. **Biosensors and Bioelectronics**: X, Volume 11, 2022, 100180. ISSN: 2590-1370.

RICKEN GARCIA, L. ; ABATTI, P. J. A simple method to determine the performance of two-coil wireless power transfer systems without direct output measurement. **International Journal of Electronics**, vol. 109, no. 8, pp. 1461-1472, 2022. DOI: 10.1080/00207217.2021.2001863.

SOMA, M.; GALBRAITH, D. C.; WHITE, R. L. Radio-frequency coils in implantable devices: misalignment analysis and design procedure. **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, BME-34, n. 4, p. 265–275, Apr. 1987.