

Analysis and Modeling of a Wireless Power Transmission System for Multiple Receivers

W.G. de Souza, *Student Member, IEEE*, L.C. Gomes, L.R.L. Lannes and D.A. de Andrade, *Member, IEEE*

Abstract— In this article the model for the study of wireless power transfer to several receivers is presented. The problem of determining the ideal loads to obtain the maximum transfer of energy in a connection between a transmitter and several receivers was considered and solved by applying the maximum power transfer theorem for N ports. This condition is derived from the circuit analysis and discussed together with the respective efficiency of the Wireless Power Transfer (WPT) system (η). In sequence, it is shown that a WPT system with multiple coils without loss of energy in the two communication circuits presents, from the maximum transfer of power and efficiency point of view, performance similar to that of a 2 coil WPT system. Simple analytical expressions for the load impedances were validated through experiments and circuit simulations. These expressions are also valid in the case of mutual coupling between receivers.

Index Terms— Circuit Matching, Magnetic Coupling, Maximum Power Transfer, Resonators, Wireless Power Transmission.

I. INTRODUÇÃO

No sistema convencional de transferência de energia sem fio (WPT), a energia é normalmente transferida da fonte para apenas uma carga [1]. Recentemente, o sistema WPT com múltiplos receptores atraiu cada vez mais atenções, onde várias cargas podem ser alimentadas simultaneamente [2]-[5]. Um sistema desse tipo poderia recarregar ou alimentar vários dispositivos móveis em um mesmo ambiente simultaneamente.

Este trabalho foi apresentado em 04 de março de 2020 e foi apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG através do projeto de pesquisa APQ-01458-1.

W. G de Souza, Centro de Ciência e Tecnologia em Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Feira de Santana, Bahia, Brasil (e-mail: wanberton@ufrb.edu.br).

L. C. Gomes, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil (e-mail: prof.luciano.coutinho@gmail.com).

L. R. L. Lannes, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil (e-mail: lucasrochalannes@gmail.com).

D. A. de Andrade, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil (e-mail: darizon.andrade@gmail.com)

Uma outra utilização prática seria a alimentação de vários veículos através da eletrificação de estradas (RPEV)[6]. Em [2], um sistema WPT com múltiplos receptores foi proposto para a equalização da tensão da célula da bateria. Bobinas múltiplas são colocadas no mesmo plano e recebem energia de uma grande bobina de transmissão. No entanto, o acoplamento mútuo entre diferentes bobinas receptoras é negligenciado. Em [3], várias bobinas receptoras com frequências ressonantes diferentes são usadas para receber energia da mesma bobina de transmissão. Ao mudar a frequência operacional da fonte, a bobina receptora com a mesma frequência de ressonância pode receber energia. No entanto, apenas um receptor funciona em um determinado momento.

Em um sistema WPT de carga múltipla, o controle da quantidade de energia é desafiador, devido aos vários efeitos de acoplamento entre bobinas diferentes. Em [4], um conversor buck é usado em cada receptor para controlar a potência da carga. Bobinas repetidoras são usadas em [5] e cada uma delas é conectada a uma carga. É apresentado em [7] que a resistência da carga deve atender a uma determinada condição para realizar a distribuição de energia igual entre todas as cargas. Isso significa que a energia da carga está acoplada uma à outra, o que a torna difícil controlar a carga em aplicações práticas.

Neste artigo, se apresenta um modelo matemático para um sistema WPT de múltiplas cargas. São apresentadas as equações correspondentes a cada circuito receptor, e estudados os efeitos das variações de diversos parâmetros que interferem na quantidade de potência recebida. Foram desenvolvidos protótipos para abordagem experimental, e comprovação de que o modelo matemático é eficaz.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Um circuito referência foi escolhido para ser usado como fundamento para o desenvolvimento da modelagem matemática, este circuito foi proposto em [8] e exibido na Fig. 1.

O circuito exibido na Fig. 1 é um modelo equivalente de um circuito ressonante RLC série, com uma indutância mútua acrescentada, resultante do acoplamento da indução gerada entre os circuitos emissor e receptor.

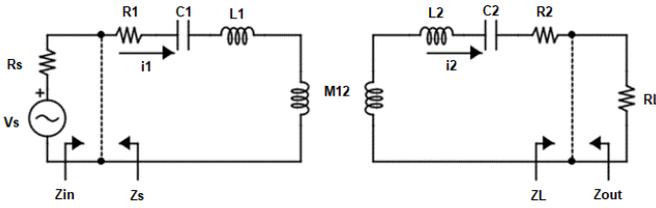


Fig. 1. Modelo de circuito referência adotado.

A transferência de potência sem fios pode ser analisada através da teoria de circuitos e pela teoria dos Modos Acoplados [9]. Neste artigo todos os modelos serão desenvolvidos através da teoria de circuitos. As equações de malha para os circuitos do primário e secundário são, através da aplicação da Lei de Kirchhoff, respectivamente:

$$V_{in} = i_1 R_1 + \frac{i_1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 i_1 - j\omega M_{12} i_2 \quad (1)$$

$$0 = i_2 R_2 + \frac{i_2}{j\omega C_2} + j\omega L_2 i_2 + i_2 R_L - j\omega M_{12} i_1 \quad (2)$$

Para efeito de simplificação e resolução computacional, é apresentado a matriz equivalente a este sistema.

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 & -j\omega M_{12} \\ -j\omega M_{12} & R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 + R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Se o circuito operar na condição de ressonância, esta matriz pode ser simplificada por:

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & -j\omega M_{12} \\ -j\omega M_{12} & R_2 + R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Se não estiver operando na ressonância, é resolvida a equação (2), com i_2 em função de i_1 , para que possa ser determinada a impedância de entrada e analisado o circuito quanto a sua eficiência.

$$i_2 \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 + R_L \right) = j\omega M_{12} i_1 \quad (5)$$

$$i_2 = \frac{j\omega M_{12} i_1}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 + R_L} \quad (6)$$

Substituindo i_2 em (1), tem-se V_{in} em função apenas de i_1 :

$$V_{in} = i_1 R_1 + \frac{i_1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 i_1 + \frac{(\omega M_{12})^2 i_1}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 + R_L} \quad (7)$$

A impedância de entrada é definida como $Z_{in} = \frac{V_{in}}{i_1}$, logo:

$$Z_{in} = R_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) + \frac{(\omega M_{12})^2}{R_2 + j \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) + R_L} \quad (8)$$

A eficiência da transferência de energia sem fios, é definida

como sendo a potência na carga sobre a potência total dissipada no circuito [9]:

$$\eta_{trans} = \frac{P_{R_L}}{P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_L}} \quad (9)$$

sendo:

P_{R_L} = Potência sobre a carga R_L ;

P_{R_1} = Potência dissipada sobre a resistência equivalente do circuito transmissor R_1 ;

P_{R_2} = Potência dissipada sobre a resistência equivalente do circuito receptor R_2 ;

Modelando o circuito exibido na Fig. 1 e admitindo ressonância, em [8] e [11] se obteve a equação:

$$\eta_{trans} = \frac{(\omega M_{12})^2 R_L}{R_1 (R_2 + R_L)^2 + (\omega M_{12})^2 (R_2 + R_L)} \quad (10)$$

Derivando a equação (10) em relação a M e igualando o resultado a zero, obtém-se a condição para que aconteça a máxima transferência de potência (MPT) [12]:

$$\omega^2 M^2 = R_1 R_2 \quad (11)$$

Avaliando as perdas no primário e secundário pode-se determinar que na condição de MPT, $P_1 = P_{2max} = \frac{v^2}{4R_1}$ e, portanto, pode-se deduzir a relação entre a potência transmitida P_2 pela máxima potência possível P_{2max} fornecendo a P_2/P_{2max} do sistema:

$$\frac{P_2}{P_{2max}} = \frac{4R_1 R_2 \omega_0^2 M^2}{(R_1 R_2 + \omega_0^2 M^2)^2} \quad (12)$$

É possível observar que os maiores valores de transferência acontecem próximos da frequência de ressonância ω_0 . As condições para conseguir uma alta eficiência na transmissão de energia, foram definidas pelos autores de [9], como sendo três:

- Operar no regime de forte acoplamento,

$$(\omega M_{12})^2 \gg R_1 R_2 \quad (13)$$

- A carga equivalente deve ser muito maior que as resistências internas,

$$R_L \gg R_1, R_2 \quad (14)$$

- A carga equivalente deve ter um valor próximo ao termo da indutância mútua,

$$R_L \approx \omega M_{12} \quad (15)$$

Portanto, garantindo essas três condições, simultaneamente, é possível obter uma maior eficiência.

A. Caso Geral: Modelo para Bobinas

A partir da análise de um sistema com um par de bobinas, foi feita a análise para circuitos com dois ou mais receptores. Ao observar as matrizes correspondentes para cada quantidade de receptores, foi verificada uma semelhança entre elas com a proposição de um modelo para qualquer quantidade de receptores com ou sem carga. O circuito de referência utilizado

para descrever o equacionamento é mostrado na Fig. 2.

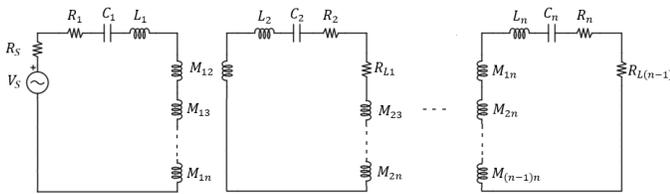


Fig. 2. Circuito referência com n-bobinas utilizado.

A partir do modelo de referência, as equações de malha do circuito são.

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -j\omega M_{12} & \cdots & -j\omega M_{1n} \\ -j\omega M_{12} & B & \cdots & -j\omega M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -j\omega M_{1n} & -j\omega M_{2n} & \cdots & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

Sendo:

$$A = \left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 \right) \quad (17)$$

$$B = \left(j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + (R_2 + R_{L1}) \right) \quad (18)$$

$$C = \left(j\omega L_n + \frac{1}{j\omega C_n} + (R_n + R_{L(n-1)}) \right) \quad (19)$$

O cálculo da potência dissipada em cada um dos circuitos pode ser descrito pelas equações.

$$P_1 = R_1 i_1^2 \quad (20)$$

$$P_2 = (R_2 + R_{L1}) i_2^2 \quad (21)$$

$$P_3 = (R_3 + R_{L2}) i_3^2 \quad (22)$$

$$P_n = (R_n + R_{L(n-1)}) i_n^2 \quad (23)$$

A eficiência do circuito pode ser calculada, para cada uma das n-cargas.

$$\eta_{trans} = \frac{P_{RL(n-1)}}{P_{R1} + P_{R2} + P_{R3} + \cdots + P_{RL(n-1)}} \quad (24)$$

A partir das equações descritas aqui, é possível descrever o funcionamento do circuito para qualquer número de bobinas. Estas equações foram utilizadas nas simulações numéricas com o propósito de validar o modelo experimental.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Para viabilizar um estudo preliminar das características de um sistema de WPT, o modelo matemático foi implementado por meio do software Matlab[®]. No projeto, foi escolhido um enlace que possibilitasse obter um sistema com alta eficiência e cuja condição de máxima transferência de potência fosse distante o suficiente para aumentar o grau de liberdade nos ensaios a serem realizados. Outra característica previamente definida foi o uso de bobinas circulares de apenas uma camada e com núcleo de ar, o que facilita sua implementação e cálculo

das indutâncias mútuas devido ao posicionamento, e têm características mais próximas às especificações requeridas pelo modelo utilizado [13]-[15]. Neste sentido, optou-se por construir as bobinas seguindo as especificações apresentadas na Tabela 1, considerando o estudo realizado por [16].

TABELA I
ESPECIFICAÇÃO DAS BOBINAS

Especificação	Símbolo	Valor
Nº de espiras	N	20
Raio da bobina	a	75 mm
Largura	l	25 mm
Diâmetro do fio	d_{wb}	0,81 mm

A Fig. 3 mostra as quatro bobinas confeccionadas para os experimentos, com o auxílio de um suporte de PVC de forma a reduzir possíveis deformações mecânicas. Os valores obtidos para as bobinas construídas são apresentados na Tabela 2. Todas as medições foram feitas utilizando o analisador de impedância vetorial Agilent (4294A).



Fig. 3. Bobinas confeccionadas seguindo as especificações da Tabela 1.

TABELA II
ESPECIFICAÇÃO DAS BOBINAS CONSTRUIDAS

	Indutância	Resistência
L_1	91 μ H	310 m Ω
L_2	91 μ H	310 m Ω
L_3	90 μ H	310 m Ω
L_4	91 μ H	310 m Ω

O gráfico da Fig. 4 apresenta o comportamento prático do coeficiente de acoplamento k considerando duas bobinas coaxiais para diferentes valores da distância c . Esses valores seguem as equações para indutância mútua e autoindutância apresentadas em [17], e a curva prática foi obtida aplicando um sinal senoidal com frequência de 55 kHz ao primário, medindo a tensão no secundário em aberto e aplicando os valores práticos na relação descrita por [18]. O erro médio (calculado por meio da expressão $erro = V_{prat} - V_{teor}$) apresentado foi de 1,4%, o que indica uma aproximação adequada entre as equações implementadas e o resultado prático.

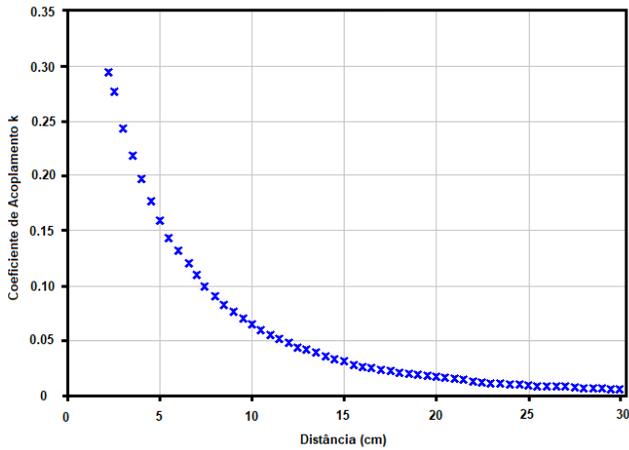


Fig. 4. Comportamento medido do coeficiente de acoplamento magnético para diferentes valores de c .

Tendo em mente que o modelo utilizado é válido para um enlace cujo transmissor e receptores estão devidamente projetados para uma mesma frequência de ressonância, é interessante utilizar capacitores de precisão, e ainda se valer do uso de um analisador de impedância para ajustar corretamente o valor da frequência de ressonância angular ω_0 tanto para o primário quanto para o secundário. Para isso, utilizou-se capacitores com precisão de 1%, que medidos apresentaram capacitâncias de 565 nF.

A tensão de entrada V_g foi obtida usando um conversor em ponte completa de frequência ajustável apresentado na Fig. 5, que foi ajustado para fornecer um sinal senoidal a 705 kHz e tensão RMS de 20V. Como o correto dimensionamento das perdas no sistema possibilita uma melhor avaliação do mesmo através do modelo matemático, optou-se por medir a resistência de entrada da fonte, que resultou em $R_g = 48\Omega$.

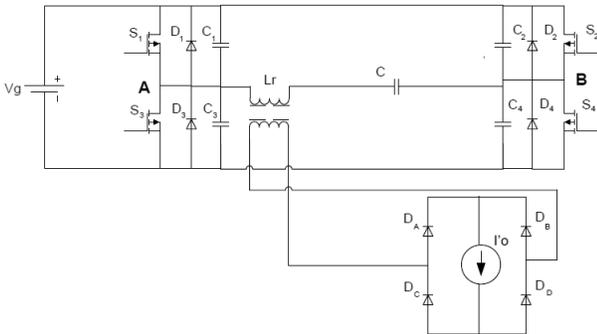


Fig. 5. Modelo do conversor utilizado.

IV. RESULTADOS

Para validar o modelo proposto, nesta seção, as comparações de dados analíticos e simulações circuitais referentes a links WPT reais de múltiplos receptores são apresentados e discutidos. São feitos testes em que a transferência de energia é feita através de um acoplamento magnético ressonante com um transmissor e (N-1) receptores. Primeiro, as fórmulas analíticas são validadas por comparação com os resultados da simulação circuital. Depois os dados obtidos pelos experimentos são apresentados.

Tanto as simulações quanto os experimentos, utilizam os valores apresentados na Tabela 3, onde todos os valores são referentes à bobina transmissora. Por uma questão de simplicidade, a definição de eficiência adotada é [19]:

$$\eta_i = \frac{P_i}{P_{in}} \quad (25)$$

Onde:

P_i é a potência consumida pela carga i .

P_{in} é a potência de entrada.

TABELA III
VALORES MEDIDOS DA INDUTÂNCIA
MÚTUA E COEFICIENTE
DE ACOPLAMENTO.

Distância	M	k
5 cm	17,38 μ H	0,191
10 cm	5,99 μ H	0,0659
15 cm	2,94 μ H	0,0323
20 cm	1,67 μ H	0,0185
30 cm	0,67 μ H	0,00739

A. Um Receptor

Para o sistema WPT de 2 bobinas (1 receptor), a eficiência medida foi dada por $P_1/(P_1 + P_{RL})$ e a potência relativa transferida por $P_{RL}/P_{2MÁX}$. Os valores calculados são dados por (10) e (12), respectivamente. A Fig. 6 apresenta os valores medidos e os valores calculados da eficiência e potência relativa para carga de 100 Ω . Os pontos são os resultados medidos e as linhas sólidas apresentam os valores calculados. A transferência máxima de energia acontece quando a eficiência é de 50%, como previsto na teoria.

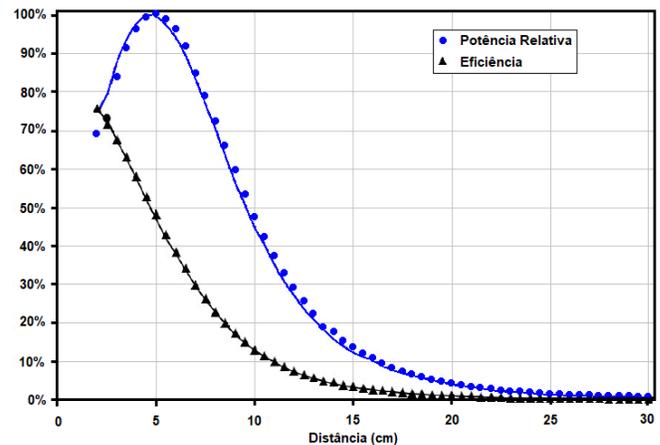


Fig. 6. Comparativo teórico e prático entre a eficiência e a potência relativa em função da distância.

As Figs. 7 e 8 apresentam uma comparação entre eficiência e potência relativa com dois valores de carga diferentes, 10 e 100 Ω . As transferências de potência máximas foram gravadas para a distância de 4,5 cm para a carga de 100 Ω e 11 cm para a carga de 10 Ω .

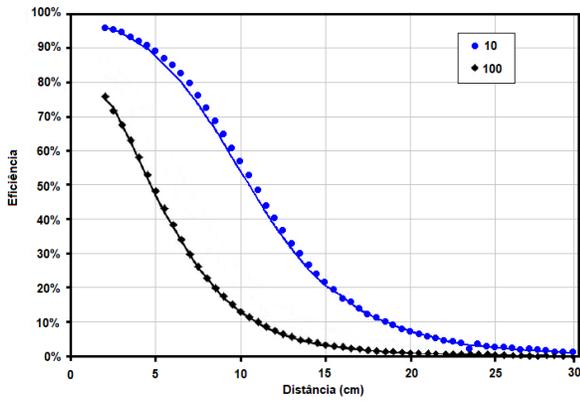


Fig. 7. Eficiência em função da distância entre as bobinas. Os pontos são valores medidos e as curvas sólidas são calculadas usando (10).

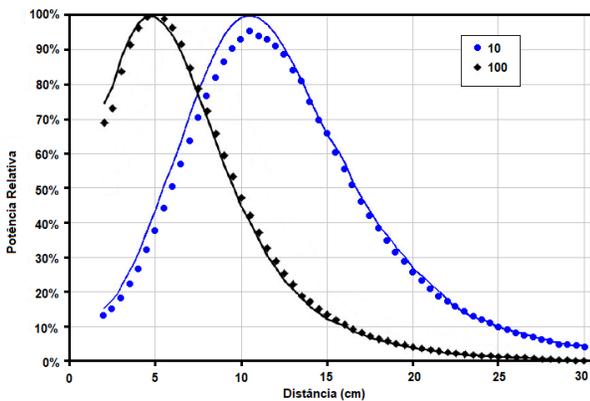


Fig. 8. Potência relativa em função da distância entre as bobinas. Os pontos são valores medidos e as curvas sólidas são calculadas usando (12).

B. Dois Receptores

Para validar as fórmulas analíticas derivadas de um link WPT usando dois receptores mutuamente acoplados (ou seja, para o caso $N = 3$), a configuração mostrada na Fig. 9 foi organizada e investigada. Foi considerado a distância de 5 cm para o primeiro receptor e de 10 cm para o segundo receptor. Dados experimentais adotados na Tabela II foram adotados tanto para as análises e simulações circuitais.

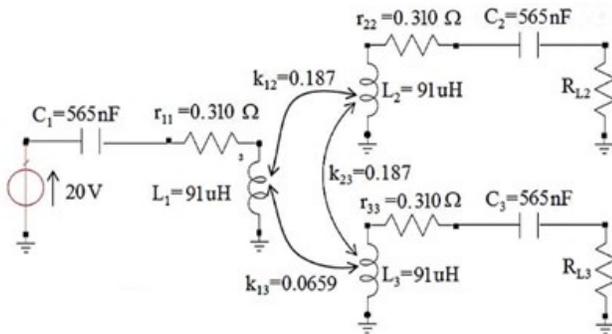


Fig. 9. Circuito utilizado para simulação no software NI AWR.

Os dados teóricos calculados são ilustrados na Tabela IV e coincidem com os calculados por simulações circuitais. A perfeita concordância entre a análise numérica e as simulações circuitais é destacada pelos resultados relatados nas Figs. 10 e

11, onde os valores da eficiência total e potência total nas cargas, respectivamente, são apresentados. Comparando os últimos números com os dados na Tabela III, é evidente que simulações circuitais confirmam os dados teóricos. Esses resultados também são confirmados a partir de medições e dados nas Figs. 12 e 13. As Figs. 12 e 13 mostram os resultados alcançados para a eficiência e a potência total, definindo uma das duas cargas resistivas para o valor ideal fornecido pelas fórmulas analíticas, variando o outro. Como pode ser observado, definindo o valor de R_{L3} ou de R_{L2} a 3Ω , o máximo de eficiência foi obtido para R_{L3} ou R_{L2} igual a 3Ω . Da mesma forma, por definir o valor de R_{L3} ou R_{L2} para 74Ω o valor máximo da eficiência foi obtida para R_{L2} ou R_{L3} igual a 78Ω .

TABELA IV
COMPARAÇÃO DA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA E MÁXIMA EFICIÊNCIA PARA O SISTEMA WPT DE DOIS RECEPTORES MOSTRADO NA FIG. 10

Parâmetro	Potência Máxima	Eficiência Máxima
R_{L2}^{opt}	78.15 Ω	3.28 Ω
R_{L3}^{opt}	73.62 Ω	3.09 Ω
p_{in}^{opt}	30.73 W	2.57 W
p_2^{opt}	7.22 W	1.12 W
p_3^{opt}	2.37 W	368 mW
p_{Tot}^{opt}	9.59 W	1.49 W
η_2	0.23	0.43
η_3	0.26	0.49
η	0.5	0.92

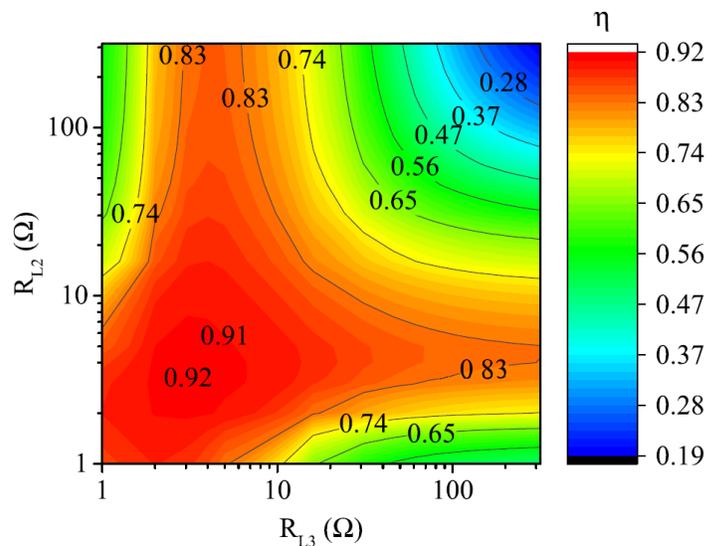


Fig. 10. Resultados de simulações circuitais obtidos pelo NI AWR para o circuito mostrado na Fig. 10: eficiência total em função dos resistores de carga.

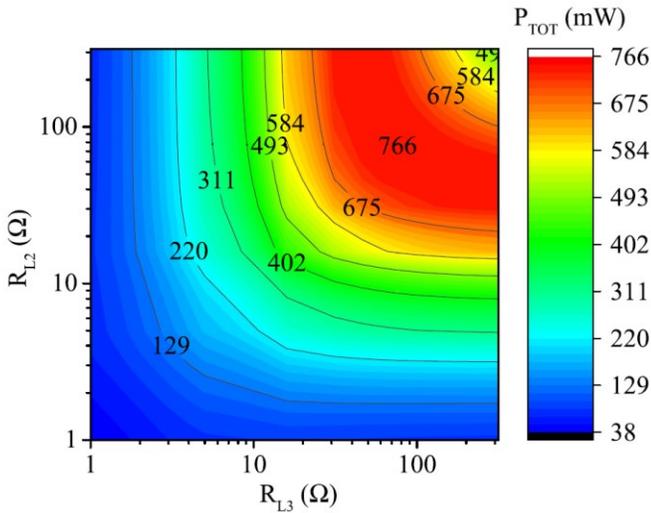


Fig. 11. Resultados de simulações circuitais obtidos pelo NI AWR para o circuito mostrado na Fig. 10: eficiência total em função dos resistores de carga.

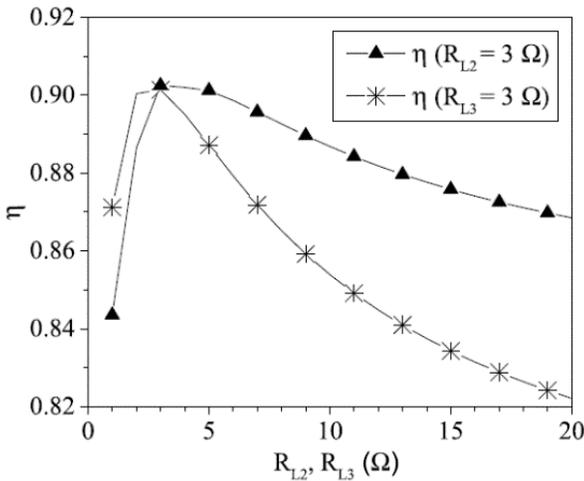


Fig. 12. Resultados obtidos das medições para a eficiência.

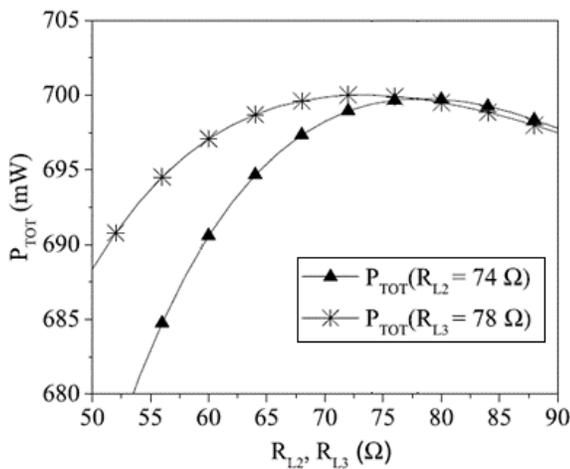


Fig. 13. Resultados obtidos a partir de medições para a potência total.

C. Três Receptores

Para este caso são considerados três receptores mutuamente acoplados (ou seja, $N = 4$). Foi considerado a distância de 5 cm

para o primeiro receptor, 10 cm para o segundo receptor e 15 cm para o terceiro receptor. Dados experimentais adotados na Tabela III foram adotados tanto para as análises e simulações circuitais. A configuração utilizada nos experimentos é apresentada na Fig. 14.



Fig. 14. Configuração usada no experimento com 4 bobinas.

Os resultados obtidos usando as fórmulas analíticas, são apresentados na Tabela V e foram verificados por simulações circuitais. Em particular, os valores das potências sobre as cargas e as eficiências calculadas por simulações circuitais são coincidentes com os dados analíticos. Além disso, vale observar que o valor total da eficiência que foi obtida para a solução da transferência de potência máxima é 0,49. Este valor está muito próximo do valor máximo de 0,5 que pode ser alcançado para um link WPT sem perdas, projetado para maximizar a potência das cargas [20]-[22]. Esta última observação fornece mais uma prova da correção do valor relatado na Tabela V para as cargas que realizam a solução de transferência de potência máxima.

TABELA V
COMPARAÇÃO DA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA E MÁXIMA EFICIÊNCIA PARA O SISTEMA WPT DE TRÊS RECEPTORES.

Parâmetro	Potência Máxima	Eficiência Máxima
R_{L2}^{opt}	185.31 Ω	13.88 Ω
R_{L3}^{opt}	365.27 Ω	27.36 Ω
R_{L4}^{opt}	405.32 Ω	30.22 Ω
p_{in}^{opt}	24.52 W	3.65 W
p_2^{opt}	2.97 W	772 mW
p_3^{opt}	5.01 W	1.3 W
p_4^{opt}	4.13 W	1.07 W
p_{Tot}^{opt}	12.11 W	3.14 W
η_2	0.12	0.21
η_3	0.20	0.36
η_4	0.17	0.29
η	0.49	0.86

V. CONCLUSÃO

O problema da determinação ideal da carga em uma rede de transferência de energia sem fio entre um transmissor e vários receptores foi considerado e resolvido. A análise analítica e as expressões das impedâncias de carga do ponto de máxima transferência de potência foi determinada. Os resultados relatados permitem derivar algumas observações úteis válidas para um link genérico WPT de múltiplos receptores. Em particular, fórmulas analíticas demonstram que, no caso em que os receptores estão desacoplados, as cargas ideais são puramente resistivas tanto para potência quanto para maximização da eficiência e que os valores correspondentes à maximização de energia são sempre maiores do que a necessária para maximizar a eficiência. De acordo com esses resultados, pode ser obtida uma faixa ideal de cargas: quanto menor o limite desse intervalo corresponde à solução que maximiza a eficiência, enquanto o limite superior corresponde à solução maximizando a transferência de energia. Além disso, para o caso de receptores, mostra-se que, tanto em potência quanto em eficiência, a mesma solução do caso desacoplado pode ser obtida por inserção de elementos reativos de compensação em série nas cargas.

REFERENCES

- [1] Z. Zhang, H. Pang, A. Georgiadis, and C. Cecati, "Wireless power transfer— an overview," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 2, pp. 1044–1058, Feb. 2019.
- [2] M. Liu, M. Fu, Y. Wang, and C. Ma, "Battery cell equalization via megahertz multiple-receiver wireless power transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 5, pp. 4135–4144, May 2014.
- [3] Y. Zhang, T. Lu, Z. Zhao, F. He, K. Chen, and L. Yuan, "Selective wireless power transfer to multiple loads using receivers of different resonant frequencies," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6001–6005, Nov. 2015.
- [4] M. Fu, H. Yin, M. Liu, Y. Wang, and C. Ma, "A 6.78 MHz multiple-receiver wireless power transfer system with constant output voltage and optimum efficiency," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 6, pp. 5330–5340, Jun. 2018.
- [5] Y. Zhang, T. Lu, Z. Zhao, K. Chen, F. He, and L. Yuan, "Wireless power transfer to multiple loads over various distances using relay resonators," *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 25, no. 5, pp. 337–339, May 2015.
- [6] J. A. Russer et al., "A system for wireless inductive power supply of electric vehicles while driving along the route," 2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Würzburg, 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/EDPC.2017.8328158
- [7] F. P. Marafão, S. M. Deckmann, H. K. Morales P., "The influence of the Voltage Referential to Power Quality Evaluation," *IEEE Latin America Magazine*, vol. 6, no. 1, pp. 81–88, March 2008.
- [8] E. M. Thomas, J. D. Heebl, C. Pfeiffer e A. Grbic, "A Power Link Study of Wireless Non-Radiative Power Transfer Systems Using Resonant Shielded Loops," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 59, pp. 2125–2136, 2012.
- [9] Souza, W. G.; Andrade, D. A.. "Análise Numérica da Eficiência Energética de Bobinas Indutivamente Acopladas na Transmissão de Energia sem Fios". In: XI Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2015, Campina Grande.
- [10] M. F. Kuhn, G. P. Breier e T. Clarke, "Passive Wireless Sensor for Displacement Monitoring in Metal Structures" em *IEEE Latin America Transactions* vol. 16, pp. 1353-1357, 2018.
- [11] E. M. Thomas, J. D. Heebl e A. Grbic, "Shielded Loops for Wireless Non- Radiative Power Transfer," em 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Toronto, 2010.

- [12] P. J. Abatti, S. F. Pichorim, and B. Schneider Junior, "A Method to Derive Mutual Inductance Properties Using Electric Circuit Analysis Tools," *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 45, pp. 46–50, 2008.
- [13] S.I. Babic; F. Sirois; C. Akyel, "Validity Check of Mutual Inductance Formulas for Circular Filaments With Lateral and Angular Misalignments". *Progress in Electromagnetics Research*, Cambridge, vol.8, no.1, pp. 15–26, 2009.
- [14] S. Babic, F. Sirois, C. Akyel and C. Girardi, "Mutual Inductance Calculation Between Circular Filaments Arbitrarily Positioned in Space: Alternative to Grover's Formula," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 9, pp. 3591–3600, Sept. 2010.
- [15] Grover, F.W. "Inductance Calculations", Ed. Dover Publications, INC, 2009.
- [16] Sychev, N.; Chekalin, M. A.; Struchkov, S. M.; "Combining the partial-capacitance and the conformal mapping techniques for analysis of the multiconductor microstrip lines". IEEE Conference Publications. 44th European Microwave Conference, Rome, pp 410–413, oct. 2014.
- [17] S. R. Khan, S. K. Pavuluri and M. P. Y. Desmulliez, "Accurate Modeling of Coil Inductance for Near-Field Wireless Power Transfer," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 9, pp. 4158–4169, Sept. 2018. doi: 10.1109/TMTT.2018.2854190
- [18] Souza, W. G.; Andrade, D. A.; Santos Júnior, J. A.; Oliveira, C. A.; Moraes Filho, M. J.; Freitas, M. A. A. "Verificação Experimental dos Fatores que Influenciam na Transferência de Potência sem Fios por Acoplamento Magnético Ressonante". In: XXI Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2016), 2016, Vitória/ES.
- [19] M. Fu, T. Zhang, C. Ma, and X. Zhu, "Efficiency and optimal loads analysis for multiple-receiver wireless power transfer systems," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 63, no. 3, pp. 801–812, Mar. 2015.
- [20] J. C. Hernandez and F. S. Sutil, "Electric Vehicle Charging Stations Fed by Renewable: PV and Train Regenerative Braking," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 7, pp. 3262–3269, July 2016.
- [21] F. Spinei, "On generalizations of the maximum power transfer problem," *Proc. IEEE*, vol. 60, no. 7, pp. 903–904, Jul. 1972.
- [22] C. Desoer, "The maximum power transfer theorem for n-ports," *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. CT-20, no. 3, pp. 328–330, May 1973.



Wanberton Gabriel de Souza é graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Controle e Automação pela Universidade de Uberaba (2012) e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2016). Atualmente é estudante de doutorado Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia. Também é professor assistente do Centro de Ciência e Tecnologia em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB. Desenvolve pesquisas nas seguintes áreas: transferência de energia sem fio, máquinas elétricas, conversores de energia elétrica e fontes alternativas de energia.



Luciano Coutinho Gomes é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1995) e doutor em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2008). Atualmente é professor adjunto da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. Desenvolve pesquisas nas seguintes áreas: acionamentos elétricos, processamento de sinais digitais, máquinas elétricas e de controle e automação industrial.



Lucas Rocha Lobo Lannes Estuda Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia. Foi estagiário no CEFET-MG e atualmente é aluno de Iniciação Científica na Laprosolda-UFU. Possui interesses de pesquisa atuais; Efeito Skin, fontes renováveis de energia e máquinas elétricas.



Darizon Alves de Andrade Engenheiro Eletricista (1984) e Mestre em Engenharia (1987) pela Universidade Federal de Uberlândia, e Ph.D. (1994) da Universidade de Leeds, Leeds, Reino Unido. Com o Grupo de Controle de Máquinas Elétricas no VTEC, EUA, conduziu pesquisas sobre novas estratégias para modelagem de máquinas com relutância. Atualmente, é professor titular da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. Desenvolve pesquisas nas seguintes áreas: transferência de energia sem fio, acionamento elétrico, conversão de energia, eficiência energética e qualidade de energia.