

## SIMULAÇÕES DE CIRCUITOS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO

### Wireless power transfer circuits' simulations

#### RESUMO

Antonio Thomaz Bittencourt Kozak  
[antoniothommaz207@gmail.com](mailto:antoniothommaz207@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Caio Marcelo de Miranda  
[caiomiranda@utfpr.edu.br](mailto:caiomiranda@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Nas últimas décadas, *links* indutivos vêm sendo amplamente utilizados em aplicações biomédicas e industriais, para alimentação ou leitura de dados de sensores (inclusive implantados ou subcutâneos) com as mais diversas finalidades. Recentemente, *links* indutivos com mais de 2 bobinas tem sido propostos para transferência de energia sem fio possibilitando um maior alcance na transmissão. Em geral, os sistemas com 3 e 4 bobinas são os mais comuns encontrados na literatura. Este estudo apresenta uma série de simulações da eficiência e potência transferida, em relação a alteração do fator de acoplamento entre as bobinas envolvidas, nos sistemas de 2, 3 e 4 bobinas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Transferência de energia sem fio, eficiência, potência.

#### ABSTRACT

In the last decades, inductive links have been widely used in biomedical and industrial applications, for feeding or reading sensor data (including implanted or subcutaneous) with the most diverse purposes. Recently, inductive links with more than 2 coils have been proposed for wireless power transfer, allowing a greater transmission range. In general, systems with 3 and 4 coils are the most common found in the literature. This study presents a series of simulations of the efficiency and transferred power, in relation to the alteration of the coupling factor between the coils involved, in the systems of 2, 3 and 4 coils.

**KEYWORDS:** Wireless Power transfer, Efficiency, Power.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Página | 2

A utilização de indutores com núcleos preenchidos por ar apresenta benefícios em relação a utilização de indutores com núcleos ferromagnéticos. Apesar de não alcançarem altos valores de indutância, indutores com material que possuem uma permeabilidade magnética relativa  $\mu_r$  próxima de 1, como é o caso do ar, não possuem efeitos de histerese outra vantagem é a baixa perda de energia em seu núcleo.

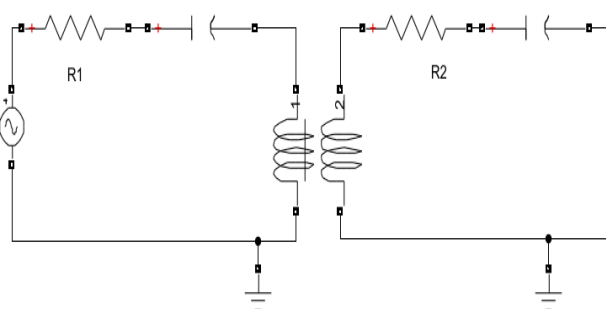
Essas vantagens são importantes em sistemas de transmissão de energia sem fio. Assim sendo, nesse artigo são estudados três circuitos que fazem uso desse tipo de indutor para transferir energia de um circuito primário para uma carga presente em um circuito magneticamente acoplado ao primário. As condições de máxima transferência de potência bem como a eficiência de cada circuito são analisadas (ABATTI; PICHORIM; MIRANDA; 2014)(CHEON, et. al., 2011).

Este artigo visa a ajudar no desenvolvimento de sistemas WPT (Wireless Power Transfer), em português “Transferência de Energia Sem Fio”. Os dados coletados neste trabalho podem auxiliar sistemas WPT pois cada circuito analisado possui certas características que podem ser úteis em diversas aplicações, principalmente nos casos de 2, 3 e 4 bobinas.

## METODOLOGIA

Foi utilizado o software Simscape Electrical pertencente ao Matlab Simulink para a realização das simulações. Simulou-se três circuitos com diferentes quantidades de bobinas magneticamente acopladas, medindo-se as potências dissipadas nos resistores para os cálculos das eficiências e potências máximas dissipadas na carga. As figuras 1, 2 e 3 ilustram a construção dos circuitos de 2, 3 e 4 bobinas, respectivamente, para a simulação.

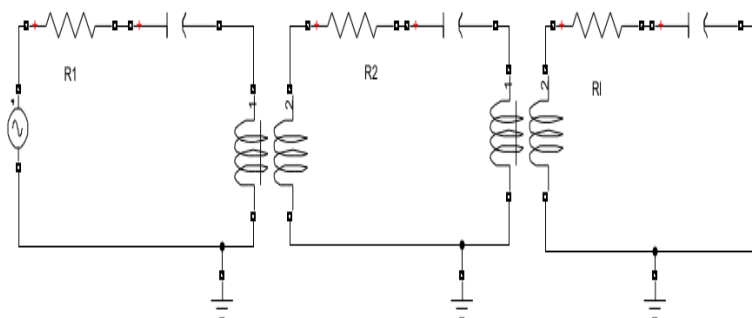
Figura 1 – Circuito com 2 bobinas feito no Simscape Electrical



Fonte: Autoria própria

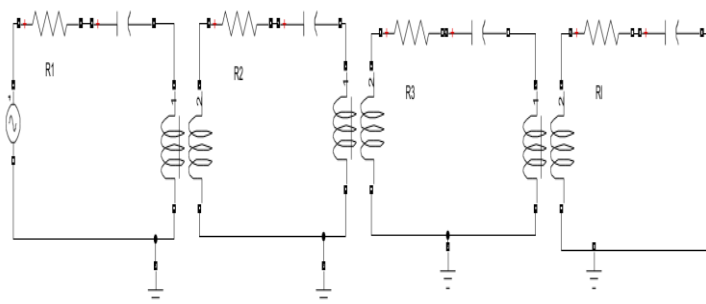
Importante salientar que também é necessária a inserção do bloco Powergui para o funcionamento do circuito acima, que ficou fora da área da imagem. Os resistores R1 e R2 possuem valores de 5 e 100 ohms respectivamente, os capacitores capacitâncias de 575pF e os indutores indutâncias de 127 $\mu$ H. A frequência da fonte de tensão é de 589kHz e a tensão de 10 Vrms. Esses valores foram escolhidos a fim de deixar o circuito em ressonância, facilitando-se a análise do circuito. As potências dissipadas em cada resistor foram medidas.

Figura 2 – Circuito com 3 bobinas, feito no Simscape Electrical



Fonte: Autoria própria

Figura 3 – Circuito com 4 bobinas, feito no Simscape Electrical



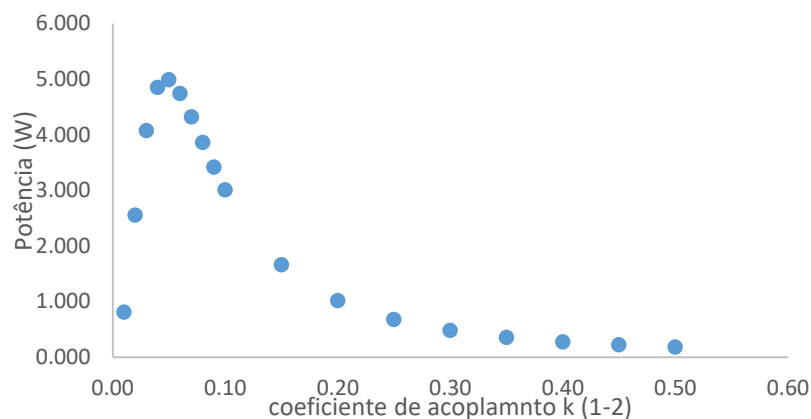
Fonte: Autoria própria

Para a Figura 2 (3 bobinas) todas as capacitâncias e indutâncias possuem os mesmos valores do circuito com duas bobinas, assim como a frequência da fonte de tensão, enquanto R1, R2 e R3 possuem resistências de 5, 5 e 100 ohms respectivamente. Foi mantido constante em 0,1 o coeficiente de acoplamento ( $k$ ) das bobinas dos circuitos primários e secundários e variou-se o coeficiente entre o segundo e terceiro circuito, medindo-se as potências dissipadas nos resistores em cada caso. Para a Figura 3 (4 bobinas) as capacitâncias, as indutâncias e a frequência da fonte mantiveram-se as mesmas dos circuitos anteriores. Os resistores R1, R2, R3 e R4 possuem valores de 5, 5, 5 e 100 ohms respectivamente. Foram medidas as potências dissipadas em todos os resistores para cada caso em que o coeficiente de acoplamento variava entre os segundo e terceiro circuitos, mantendo-se os coeficientes de acoplamento entre o primeiro e segundo circuito, e entre o terceiro e quarto, fixos em 0,1.

## RESULTADOS

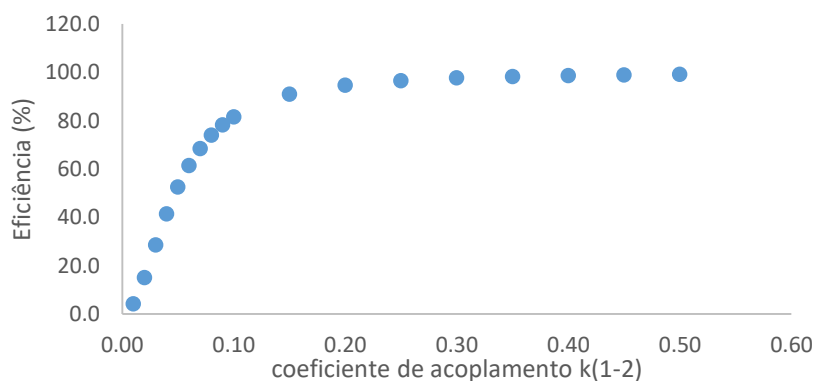
Para o circuito com 2 bobinas, considerando-se as resistências, as capacitâncias e as indutâncias já apresentadas na metodologia, simulou-se o circuito e obteve-se os seguintes gráficos presentes nas Figuras 4 e 5. Para a eficiência considerou-se a razão entre a potência dissipada na carga e a potência entregue pela fonte de tensão.

Figura 4 – Potência na carga em função do coeficiente de acoplamento para o sistema de 2 bobinas



Fonte: Autoria própria

Figura 5 – Eficiência em função do coeficiente de acoplamento para o sistema de 2 bobinas



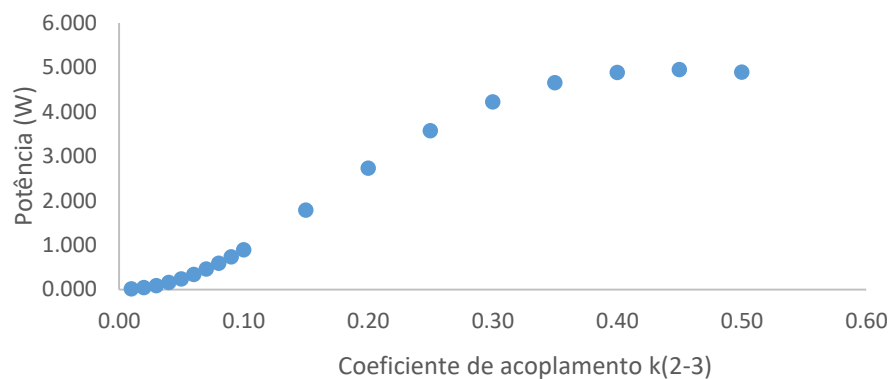
Fonte: Autoria própria

A potência atinge um máximo valor quando o coeficiente  $k(1-2)$  situa-se entre 0 e 0,1; sendo que nessa mesma faixa de valores a eficiência atinge 50%. Isto está de acordo com o teorema da máxima transferência de potência. Também é possível notar que a eficiência aumenta quanto maior o coeficiente de acoplamento, ou seja, quanto mais próximas as duas bobinas estiverem uma da outra. As mesmas simulações foram feitas para o sistema com três bobinas. Vale ressaltar que neste estudo as bobinas 1 e 3 devem estar a uma distância suficiente para que o coeficiente de acoplamento entre elas não seja considerável.

A eficiência também possui um máximo valor nesse caso, sendo que a ocorrência da maior dissipação de potência na carga não coincide com os 50% de eficiência. Mantendo a distância entre as bobinas 1 e 2 constante e diminuindo-se a distância entre as bobinas 2 e 3 (com o cuidado para não deixar as bobinas 1 e 3 suficientemente próximas) percebe-se que a eficiência não necessariamente aumenta. Também foram feitas simulações para o sistema com 4 bobinas, mantendo-se as distâncias entre as bobinas 1 e 2, 3 e 4 constantes. A eficiência e a potência máximas apresentam-se para valores diferentes de coeficiente de

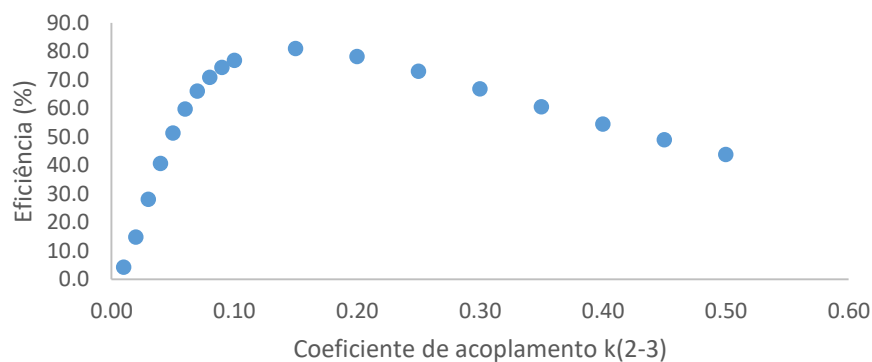
acoplamento, sendo que a potência máxima dissipada na carga não ocorre quando é igual a potência dissipada no circuito primário.

Figura 6 – Potência em função do coeficiente de acoplamento para o sistema de 3 bobinas.



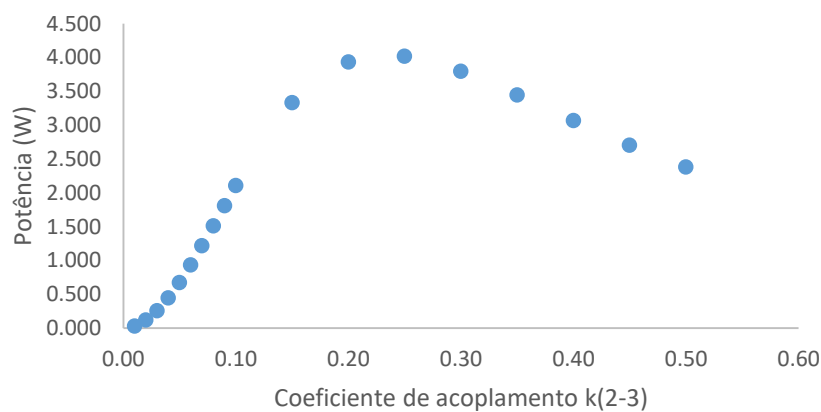
Fonte: Autoria própria.

Figura 7 – Eficiência em função do coeficiente de acoplamento para o sistema de 3 bobinas



Fonte: Autoria própria

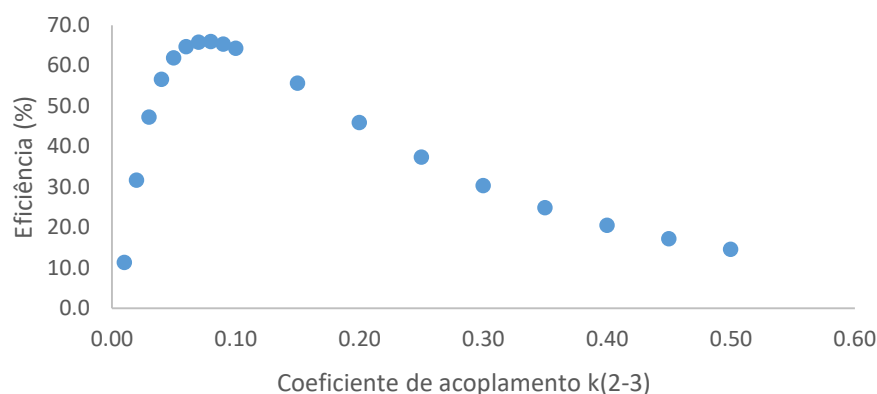
Figura 8 - Potência em função do coeficiente de acoplamento para o sistema de 4 bobinas





Página | 6

Figura 9 – Eficiência em função do coeficiente de acoplamento para o sistema de 4 bobinas



Fonte: Autoria própria

## CONCLUSÕES

Os resultados das simulações são bastante interessantes a respeito das características de cada circuito em resposta à variação do coeficiente de acoplamento. Este que pode ser modificado alterando-se a distância entre duas bobinas. Essa característica pode ser interessante para aplicações que fazem uso de um circuito primário e que desejam controlar a potência dissipada em uma carga em outro circuito magneticamente acoplado. Este artigo também ajuda na análise do uso de indutores preenchidos a ar, ou com núcleos com permeabilidades magnéticas muito reduzidas em comparação a materiais ferromagnéticos.

## REFERÊNCIAS

ABATTI, P. J., PICHORIM, S. F., MIRANDA, C. M. Maximum power transfer versus efficiency in mid-range wireless power transfer systems, J. of Microw. Optoelectron. and Electromagn. Appl. 2015; 14: 157–169

CHEON, S., KIM, Y. H., KANG, S. Y., LEE, M. L., LEE, J. M., ZYUNG, T. Circuit-Model-Based Analysis of a Wireless Energy-Transfer System via Coupled Magnetic Resonances, IEEE Trans. Ind. Electron. 2011; 58: 2906-2914

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.