

VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DOS FATORES QUE INFLUENCIAM NA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA SEM FIOS POR ACOPLAMENTO MAGNÉTICO RESSONANTE

WANBERTON G. DE SOUZA, DARIZON A. DE ANDRADE, JOSEMAR A. DOS S. JÚNIOR, CÁSSIO A. DE OLIVEIRA,
MARCOS J. DE M. FILHO, MARCOS A. A. DE FREITAS

LABORATÓRIO DE ACIONAMENTOS ELÉTRICOS, FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU

AV. JOÃO NAVES DE ÁVILA 2121 – CAMPUS SANTA MÔNICA – UBERLÂNDIA – MG – CEP 38408-100

E-MAILS: WANBERTON@UFU.BR, DARIZON@UFU.BR, JOSEMARJR@GMAIL.COM, KASS-07@HOTMAIL.COM, MARCOSANTONIOARANTESDEFREITAS@YAHOO.COM.BR

Abstract— This work is a study and development of a prototype for power transfer without the use of wires. Through a transformer with core air and low coupling factor, power transmission is carried out with satisfactory levels from the resonant magnetic coupling. the factors that influence the efficiency of the transmission and reception are analyzed in order to improve system performance. such systems can have numerous future applications, such as recharge portable devices, applications in medical diagnostic equipment or implants, and also in electric vehicles.

Keywords— Wireless power transmission, magnetic induction, resonant inductive coupling.

Resumo— Neste trabalho é realizado um estudo e a elaboração de um protótipo para transferência de potência sem o uso de fios. Através de um transformador com núcleo a ar e baixo fator de acoplamento, é realizada a transmissão de potência com níveis satisfatórios a partir do acoplamento magnético ressonante. São analisados os fatores que influenciam na eficiência da transmissão e recepção, visando melhorar o desempenho do sistema. Os sistemas desse tipo podem ter inúmeras aplicações futuras, tais como recarga de dispositivos portáteis, aplicações em equipamentos para diagnóstico médico ou implantes, e também nos veículos elétricos.

Palavras-chave— Transmissão de potência sem fios, indução magnética, acoplamento indutivo ressonante.

1 Introdução

O estudo das técnicas de Transmissão de Energia Sem Fios - TESH vem ganhando crescente interesse da comunidade científica nos últimos anos. Com o avanço da tecnologia tem se observado um aumento continuado de equipamentos e dispositivos portáteis e autônomos que funciona a base de energia elétrica, e que tipicamente incorpora baterias recarregáveis como fonte de energia. Estas precisam ser recarregadas periodicamente, e para tanto utilizam carregadores ou estações de recarga que são conectados fisicamente por meio de cabos elétricos às fontes de suprimento de energia convencionais, isto é, às tomadas de energia elétrica. Notebooks, smartphones, tablets e veículos elétricos de pequeno e grande porte são exemplos. Também, na área da saúde, pessoas que utilizam algum tipo de dispositivo médico auxiliar como marca-passos ou outros precisam periodicamente substituir ou recarregar as baterias destes equipamentos. Claramente, o ato de conectar o equipamento à fonte de energia fixa se manifesta como um transtorno, reduzindo a mobilidade e consequentemente a flexibilidade de utilização e autonomia desses equipamentos. (Fernandes et al., 2013)

Uma forma conveniente que se vislumbra para dar mais flexibilidade à utilização desses dispositivos é proceder à recarga dos seus acumuladores de energia, por meio da técnica da transmissão de energia sem fios. Em transformadores convencionais com

enrolamentos separados ocorre a transmissão de energia sem fios, mas esta técnica não tem utilidade para os propósitos aqui mencionados, visto que o acoplamento magnético se dá via núcleos magnéticos de alta permeabilidade magnética, que fixam rigidamente o primário (ou transmissor) com o secundário (receptor). Na transmissão de energia sem fios, transmissor e receptor normalmente estão acoplados magneticamente em meios de muito baixa permeabilidade magnética como, por exemplo, o ar. Por isso, o acoplamento mútuo entre transmissor e receptor nas frequências convencionais se torna muito fraco, inviabilizando a transferência de energia. Neste caso, o recurso técnico que viabiliza a transmissão é o da ressonância, mais especificamente ressonância magnética, onde os circuitos do transmissor e receptor são sintonizados para operar na frequência de ressonância, maximizando a transferência de energia (Elliot et al., 1995). Portanto, dispositivos para TESH utilizam os conceitos de ressonância magnética entre dois circuitos elétricos onde as frequências devem ser ajustáveis e por isso somente se tornam factíveis utilizando recursos de eletrônica de potência.

Estudos recentes apresentados em investigações efetuadas no *Massachusetts Institute of Technology*-MIT, onde se obteve uma eficiência considerada satisfatória na transmissão de potência sem fios, surgiu um modelo de TESH utilizando o acoplamento indutivo ressonante (Moffatt, 2009).

Este trabalho utiliza deste modelo, para projetar um sistema de transferência de potência sem fios e

analisar matemática e experimentalmente os fatores limitantes da eficiência desse tipo de transmissão.

2 Fundamentos Teóricos

O transformador elétrico é o exemplo mais simples de TESF. Os circuitos do primário e secundário de um transformador não estão diretamente conectados. A transferência de energia se dá através do acoplamento eletromagnético por meio de um processo conhecido como indução mútua. Um benefício adicional é a capacidade de alterar a tensão primária, quer para cima ou para baixo. A principal desvantagem da indução mútua é o curto alcance. Geralmente estão conectados magneticamente através de núcleos de ferro ou outro material.

No caso da TESF, é preciso uma distância maior, e por isso o transformador a núcleo de ar seria a primeira opção. Mas ao analisar o enlace magnético de um transformador deste tipo, observa-se que o coeficiente de acoplamento é pequeno, dificultando a eficiência da transmissão (Seo et al., 2012).

Para melhorar esse acoplamento, o estudo é feito através do campo magnético variável no tempo, não radiante, em vez de ondas eletromagnéticas riantes. Para isso, são usados dois sistemas ressonantes, um emissor e outro receptor, sintonizados em uma mesma frequência, através de dois circuitos RLC paralelo, conforme Figura 1.

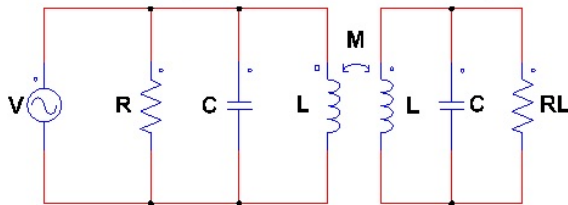


Figura 1. Circuito RLC representativo para TESF

A forte interação necessária, entre o emissor e o receptor, é dada pela natureza ressonante do processo, de forma a garantir a máxima transferência de energia entre os dois sistemas e a mínima interação com o ambiente envolvente (Seo et al, 2012).

No caso particular da transmissão de energia elétrica sem o uso de qualquer cabo nem suporte de qualquer material ferromagnético, a energia é adicionada ao sistema ressonante pelo acoplamento magnético entre o sistema ressonante emissor e receptor.

O acoplamento entre as bobinas emissora e receptora é descrito pela teoria de modos acoplados, que mostra a possibilidade de transferência de energia entre dois objetos ressonantes (Haus, 1984). A modelagem matemática pode ser feita recorrendo a duas equações diferenciais (Kurs, 2007). As equações diferenciais referidas são:

$$\frac{da_1(t)}{dt} = (j\omega_1 - \Gamma_1)a_1(t) + jka_2(t) + f(t) \quad (1)$$

$$\frac{da_2(t)}{dt} = (j\omega_2 - \Gamma_2)a_2(t) + jka_1(t) \quad (2)$$

Em que a_1 e $a_2(t)$ são definidos como $|a_i(t)|^2$ representando a energia num determinado instante, nos sistemas ressonantes 1 e 2, respectivamente do emissor e do receptor. Também ω_i e Γ_i são respectivamente a frequência de ressonância e o fator de perdas associado a cada um desses sistemas ressonantes, k é o fator de acoplamento e $f(t)$ é a energia injetada na entrada do sistema.

Desenvolvendo matematicamente a expressão com o auxílio das transformadas de Laplace e com algumas considerações especiais e simplificações, são obtidas as expressões (3) e (4) que representam o sistema de transferência de potência entre duas estruturas ressonantes (Bodrov et al., 2012).

$$a_1(t) = \sqrt{A}e^{-\Gamma t}e^{j\omega t}\cos(kt) \quad (3)$$

$$a_2(t) = \sqrt{A}e^{-\Gamma t}e^{j\omega t}j\sin(kt) \quad (4)$$

Onde A é a quantidade de energia injetada no sistema. Portanto através dessas expressões pode concluir que se a razão entre o fator de acoplamento e o fator de perdas, for grande, ou seja, $\frac{k}{\Gamma}$ for maior que a unidade, significa que existe uma razão de transferência elevada. Esta situação difere da tradicional indução magnética e da transferência por radio-frequência.

Isso significa que a energia oscila entre os elementos ressonantes, do que resulta para a energia total a expressão (5).

$$E_t = E_1 + E_2 = |a_1(t)|^2 + |a_2(t)|^2 = Ae^{(\Gamma_1 + \Gamma_2)t} \quad (5)$$

Observa-se que a energia decai exponencialmente com a taxa das perdas. As perdas neste sistema serão principalmente a resistência interna das bobinas e as reatâncias dos indutores e dos capacitores. Mas com o sistema sintonizado na frequência de ressonância, temos que $X_L = X_C$, de forma que essa perda é minimizada.

2.1 Eficiência

A eficiência de um sistema de transmissão de energia sem fio pode ser definido pela equação:

$$\eta = \frac{P_{recebida}}{P_{transmitida}} \quad (6)$$

A máxima transferência de potência que pode ser fornecida a um dispositivo ocorre quando se dá o chamado casamento de impedâncias. O circuito equivalente para TESF a partir de um circuito RLC paralelo real é ilustrado na Figura 2.

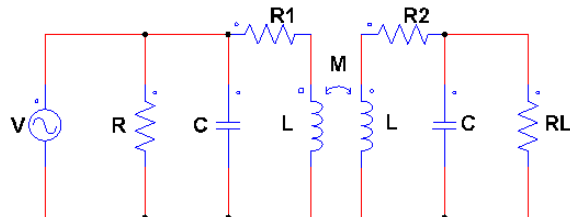


Figura 2. Circuito RLC paralelo equivalente

Onde R_1 e R_2 representam as resistências internas das bobinas 1 e 2, respectivamente. A admitância de entrada é dada por (7).

$$G_i = \frac{1}{R} + j\omega C + \frac{1}{R_1 + j\omega L} + G_r \quad (7)$$

Onde G_r é dado por (8).

$$G_r = \frac{\omega^2 M^2}{\frac{1}{R_L + j\omega C} + \frac{1}{R_2 + j\omega L}} \quad (8)$$

Considerando os componentes indutivos e capacitivos dos dois circuitos como sendo idênticos, e com algumas manipulações matemáticas, a eficiência do sistema acoplado é dada pela Equação (9) (Thomas et al., 2010).

$$\eta = \frac{(\omega M_{12})^2 R_L}{R(R_2 + R_L)^2 + (\omega M_{12})^2 (R_2 + R_L)} \quad (9)$$

Onde:

M_{12} = Indutância mútua

R_L = Resistência da carga

R_1, R_2 = Resistências internas das bobinas 1 e 2 respectivamente.

A Figura 3 apresenta o comportamento da eficiência de um sistema de TESF em relação à frequência.

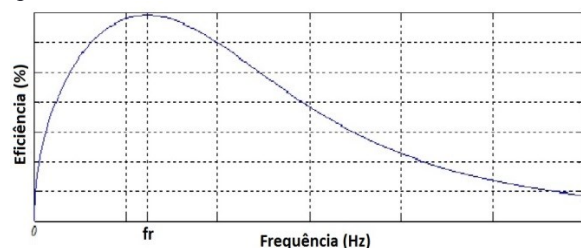


Figura 3. Comportamento da eficiência com a variação da frequência.

É possível observar que os maiores valores de transferência acontecem próximos da frequência de ressonância. As condições para conseguir uma alta eficiência na transmissão de energia são definidas como sendo três:

- Operar no regime de forte acoplamento, $(\omega M_{12})^2 \gg R_1, R_2$ (10)

- A carga equivalente deve ser muito maior que as resistências internas, $R_L \gg R_1, R_2$ (11)

- A carga equivalente deve ter um valor próximo ao termo da indutância mútua, $R_L \approx \omega M_{12}$ (12)

Portanto, garantindo essas três condições, simultaneamente, é possível obter uma maior eficiência (Thomas et al., 2010).

3 Projeto

A distância entre emissor e receptor é uma das principais especificações do sistema. As indutâncias e o fator de acoplamento magnético correspondente são utilizados no cálculo dos parâmetros do sistema.

Diversas formas de geometria podem ser utilizadas para a construção dos indutores para TESF. Nesse protótipo foi escolhido a utilização de bobinas planares. As bobinas foram construídas para apresentarem as mesmas características físicas tanto para o emissor quanto no receptor.

O fio utilizado para a construção das bobinas foi de cobre esmaltado com diâmetro de 9 AWG. Cada indutor foi composto de 20 voltas. Os valores calculados para a indutância e para resistência, assim como os valores medidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Comparativo dos parâmetros das bobinas medidos e calculados.

Valores Calculados		Valores Medidos			
		Bobina Emissora		Bobina Receptora	
L	R	L	R	L	R
20.5 μ H	10.9 m Ω	22.6 μ H	14.9 m Ω	21.9 μ H	14.9 m Ω

3.1 Indutância Mútua

A indutância mútua é um dos fatores mais importantes para a TESF, pois seu valor afeta a mudança da frequência de ressonância, alterando o acoplamento do circuito, e consequentemente a eficiência da transmissão. Esta indutância mútua (M) é função da distância de separação entre as bobinas.

A indutância mútua é a influência que cada anel, ou volta da espira emissora, efetua na bobina receptora. Para ilustrar esta situação a Figura 4, apresenta dois anéis circulares e mostra que um mesmo ponto de um anel, afeta mais de uma região no outro.

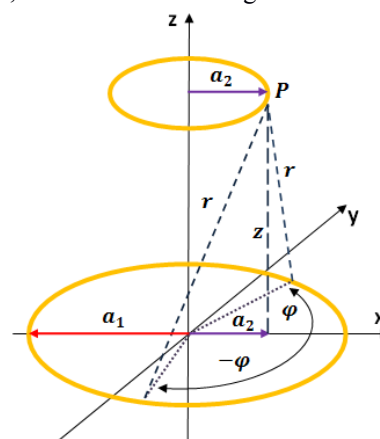


Figura 4. Acoplamento mútuo entre anéis circulares (Grover, 2009).

A equação de Neumann permite determinar a indutância mútua entre dois anéis circulares coaxiais de raios a e b , separados por uma distância D (Grover, 2009).

$$M = \mu_0 \cdot \sqrt{a \cdot b} \cdot \left[\left(\frac{2}{g} - g \right) \cdot K(g) - \frac{2}{g} \cdot E(g) \right] \quad (13)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo ou ar, $K(g)$ e $E(g)$ são integrais elípticas de 1ª e 2ª ordem, respectivamente, e g é um fator geométrico dado por :

$$g = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot b}{D^2 + (a+b)^2}} \quad (14)$$

Assumindo que cada espira das bobinas planas seja um anel circular e aplicando a Equação (13), pode-se determinar a indutância mútua entre duas bobinas planas.

A solução da relação entre a indutância mútua e a distância de separação (D) pode ser implementada numericamente com o auxílio de qualquer software de manipulação matemática (Excel®, MatLab®, SigmaPlot®).

Através dos valores obtidos nos parâmetros construtivos das bobinas, calculou-se a indutância mútua entre as bobinas emissora e receptora idênticas, para uma faixa de separação de 1 a 15 centímetros, o resultado é apresentado na Figura 5.

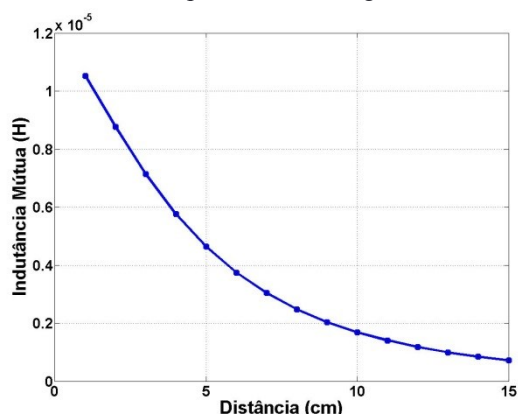


Figura 5. Relação teórica entre a indutância mútua e a distância.

Pode observar que conforme a distância aumenta, o valor da indutância mútua diminui. Cabe ressaltar que estes valores de indutância mútua, são para cada uma das bobinas, pois o conceito de indutância mútua relaciona o efeito que a bobina 1 causa na bobina 2, e o efeito que a bobina 2 causa na bobina 1. Como as duas bobinas são iguais, temos que L_{12} , é igual L_{21} .

3.2 Circuitos Emissor e Receptor

Neste trabalho, foi utilizado um conversor acionado através do gerador de sinais para abranger uma ampla faixa de frequências, a fim de verificar experimentalmente o comportamento da potência transmitida através da variação de frequência. A conversão

se dá através do chaveamento de um MOSFET de potência capaz de controlar a carga que é o circuito ressonante. A resistência R_s é inserida para limitar o valor da corrente do circuito. A Figura 6 ilustra o circuito do emissor.

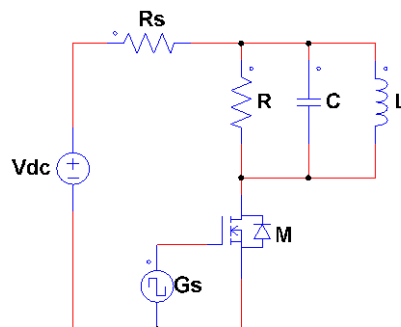


Figura 6. Circuito Emissor

A utilização de bobinas idênticas no emissor e receptor faz com que o capacitor de ambos os circuitos ressonantes sejam também iguais. No circuito do receptor, a tensão recebida terá valores de frequência da mesma ordem da frequência de transmissão. A utilização de tensões desta ordem de frequências não é comum, sendo, portanto necessário retificá-la para qualquer aplicação prática.

Devido à alta-frequência, é necessário o uso de diodos especiais, de recuperação rápida, para que consiga bloquear o semiciclo negativo da tensão. O circuito do receptor é ilustrado na Figura 7.

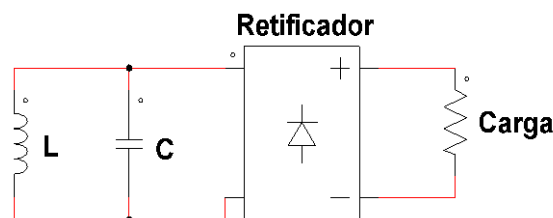


Figura 7. Circuito Receptor

O valor definido para a frequência de ressonância do circuito foi de 23KHz, por causa da frequência de operação do Mosfet utilizado para o chaveamento. Com isso os capacitores utilizados foram de 2,2µF, para levar o circuito à ressonância nesta frequência.

3.3 Eficiência do circuito

Através dos valores da indutância mútua e dos parâmetros do circuito, é possível simular a eficiência do circuito proposto. O resultado da análise entre a eficiência em relação à distância entre os indutores é apresentado na Figura 8.

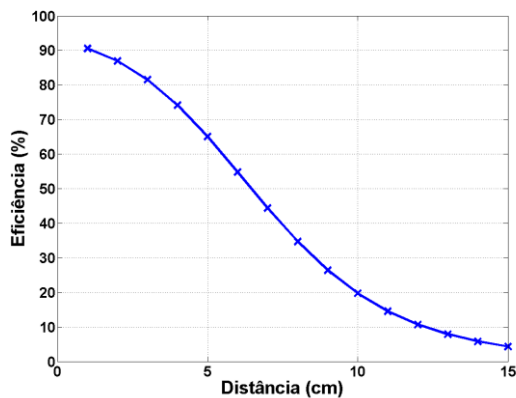


Figura 8. Eficiência simulada em relação à distância entre as bobinas.

Conforme observado a Figura 8, quanto menor a distância entre as bobinas, maior a eficiência da transmissão. Isto se deve ao fato de a indutância mútua e o fator de acoplamento serem maiores, quanto mais próximos os dois indutores estão. Além disso, com a alteração da distância e consequentemente da indutância mútua, o valor da frequência de ressonância tem uma leve variação devido à variação da indutância total do sistema.

4 Resultados

Para a análise da eficiência do circuito de TESF proposto foi definido verificar a influência da distância e da frequência separadamente. A carga aplicada em ambas situações foi a mesma, sendo uma resistência de 48Ω . Os resultados para cada uma dessas etapas estão descritos abaixo.

4.1 Eficiência com a variação da distância

As Figuras 9 e 10 apresentam as formas de onda dos circuitos emissor e receptor à distância de 5 centímetros. O canal 1 e o canal 2 apresentam os sinais de tensão e corrente do transmissor e o canal 3 a tensão do receptor.

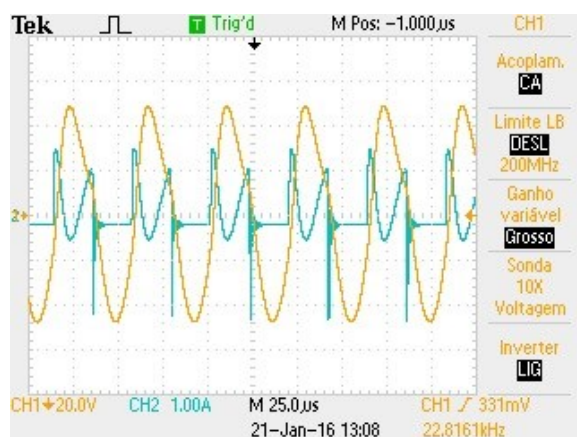


Figura 9. Tensão e corrente no circuito emissor com distância de 5cm.

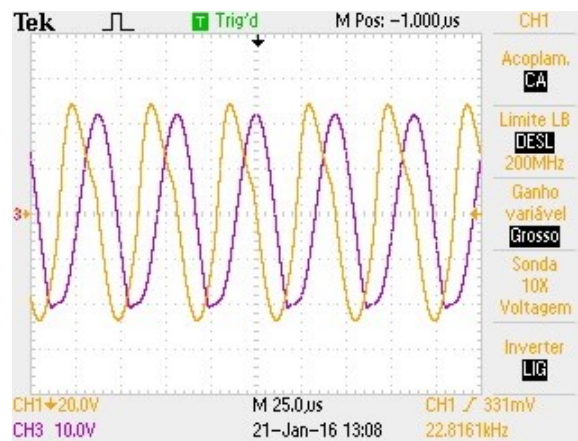


Figura 10. Tensão no emissor e no receptor com distância de 5cm.

A Figura 11 apresenta a eficiência medida em função da variação da distância. Através dos sinais do circuito transmissor medidos, foi calculada a potência instantânea, e depois a potência média para fazer essa análise. No circuito receptor, a potência foi calculada após a retificação.

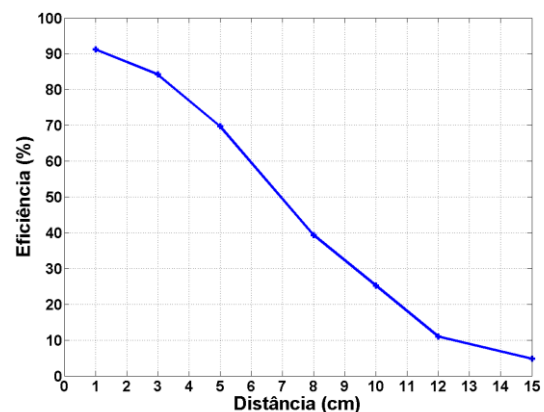


Figura 11. Variação da eficiência de transmissão em relação à distância.

Comparando os valores apresentados na Figura 8 e a Figura 11, se observa que os valores de rendimento calculados e o real são próximos para o circuito em questão. É possível verificar que à distância abaixo de cinco centímetros o rendimento é elevado. Isto se deve ao campo magnético do emissor ser maior nas regiões próximas. Para a comparação foi efetuado um teste com as bobinas formando um transformador com núcleo a ar, na frequência da rede. Foi verificado que o rendimento desse transformador não ultrapassou 10%, reforçando a teoria de acoplamento ressonante.

4.2 Eficiência com a variação da frequência

Também foi realizado o ensaio para verificar a influência da frequência no processo de transmissão de potência sem fio. Foi fixada a distância de dez centímetros, e variou-se a frequência para valores acima e abaixo da frequência de ressonância.

A Figura 12 apresenta o gráfico com a relação entre a frequência e a eficiência da transmissão de potência obtida experimentalmente.

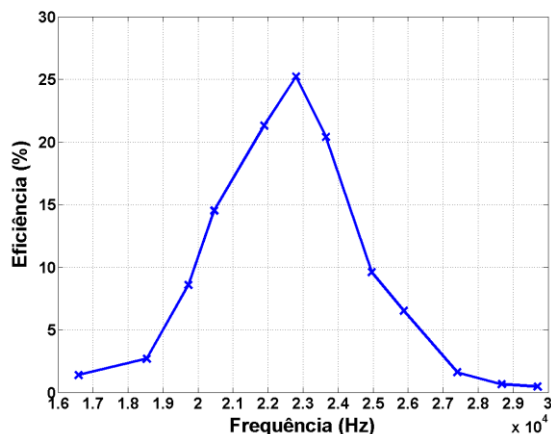


Figura 12. Variação da eficiência de transmissão em relação à frequência.

Em relação à frequência, pode se observar que a causa principal da transmissão de potência sem fios é o acoplamento ressonante, pois nos dois extremos fora da frequência de ressonância os valores de potência transmitida são irrisórios. A Figura 13 apresenta o circuito utilizado para os ensaios, alterando a carga para uma lâmpada LED.

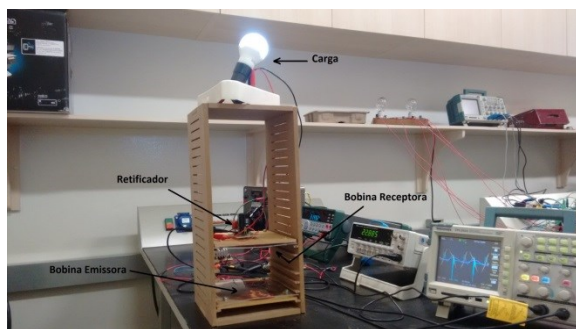


Figura 13- Ensaio com lâmpada de LED.

5 Conclusão

Foi possível observar o comportamento do sistema com as variações de distância e frequência de modo a comprovar os efeitos teóricos apresentados. A distância de separação entre as bobinas é um fator determinante para quantificar a eficiência na transmissão de potência sem fios, assim como trabalhar na frequência de ressonância.

É interessante salientar que este sistema pode ser aprimorado para ter uma melhor eficiência. Mudar a frequência de ressonância através da alteração do capacitor pode ser uma alternativa, pois conforme a bibliografia mostra quanto às condições para se melhorar a eficiência é operar no chamado regime de forte acoplamento, o que depende de $(\omega M)^2 \gg R_1, R_2$. No caso analisado à distância de 10 centíme-

tros o valor de $(\omega M)^2$ é de cerca de 36 vezes o valor da resistência das bobinas.

Outra forma de se aumentar a eficiência do sistema é alterando o valor da carga como é mostrado pela condição $R_L \approx \omega M_{12}$. Para esse caso o valor da carga deveria diminuir em relação ao que foi ensaiado. Mas o termo ωM_{12} é bem pequeno, tornando difícil essa tarefa. Dessa forma se alterasse a frequência de ressonância para um valor superior, poderia resolver as duas situações para melhorar a eficiência.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UFU pela disponibilização das instalações físicas, à FAPEMIG (TEC APQ01458-15) pela ajuda financeira e à CAPES pela concessão de bolsa de estudo.

Referências Bibliográficas

- Bodrov, A.; Sul, S.K. (2012). Analysis of Wireless Power Transfer by Coupled Mode Theory (CMT) and Practical Considerations to Increase Power Transfer Efficiency. Wireless Power Transfer - Principles and Engineering Explorations, Dr. Ki Young Kim (Ed.), ISBN: 978-953-307-874-8, InTech.
- Elliott, G.A.J.; Boys, J.T.; Green, A.W. (1995). Magnetically Coupled Systems for Power Transfer to Electric Vehicles. In Prof. of IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp. 797-801.
- Fernandes, R. C.; Oliveira Jr, A. A. (2013). Tópicos selecionados sobre o Estado-da-Arte em Transferência Indutiva de Potência. Eletrônica de Potência, v.19, n.1 p.058-071, dez. 2013/fev.2014
- Grover, F.W. (2009). Inductance Calculations. Ed. Dover Publications, INC.
- Haus, H. A. (1984). Waves and Fields in Optoelectronics", Ed. Prentice-Hall.
- Kurs, A. (2007). Power Transfer Through Strongly Coupled Resonances. MIT, September 2007.
- Moffatt, R. A. (2009). Wireless Transfer of Electric Power. MIT, June 2009.
- Seo, Y.S.; Hughes, Z.; Hoang, M.; Isom, D. (2012). Investigation of Wireless Power Transfer in Through-wall Applications. In Proc. of Asia-Pacific Microwave Conference, pp. 403-405.
- Thomas, E.M.; Heibl, J.D. e Grbic, A. (2010). Shielded loops for wireless non-radiative power transfer. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2010.