Insper

Curso de Engenharia de Mecatrônica

Relatório Final de Iniciação Tecnológica

Nicole Sarvasi Alves da Costa

Orientador: Prof. Fábio Hage

Projeto: Transmissão de Energia Elétrica Sem Fio

São Paulo

2022

Resumo

A transmissão de energia elétrica sem fio, sem uma conexão elétrica física, possibilita uma enorme variedade de aplicações, desde o carregamento de telefones celulares até operações espaciais [1] [2] [3] [4]. A habilidade de transmitir energia elétrica sem fio, de um modo eficiente e seguro, pode revolucionar o modo como sistemas de energia elétrica são utilizados pelo mundo. Com isso em mente, a presente pesquisa pretende modelar, simular e validar uma tecnologia de transmissão de energia elétrica sem fio com o objetivo de apreender conhecimento e propor caminhos de aprimoramento em pesquisas futuras. O método de transmissão de energia elétrica sem fio utilizado na pesquisa é denominado acoplamento magnético indutivo por ressonância. Ao longo do relatório, será detalhado o histórico e o funcionamento de tal método, assim como sua modelagem e simulação computacional, além da análise dos desafios para os desenvolvimentos do protótipo.

Palavras-chave: Transmissão de energia elétrica sem fio. Acoplamento indutivo ressonante. Ressonância eletromagnética.

Abstract

Wireless Power Transfer (WPT) is the transmission of electric power without a physical electrical connection, enabling an enormous range of applications, from charging cellphones to space operations [1] [2] [3] [4]. The ability to transfer energy wirelessly, in an efficient and safe way, can revolutionize how power systems are used globally. With that in mind, this research intends to analyze and test WPT technologies with the goal of proposing a path to the development of this applied science. The chosen WPT method used in this research will be magnetic coupling. Throughout the research the method's history, functioning and uses will be thoroughly explained, as well as its modelling and simulation, and prototype challenges and upgrades.

Keywords: Wireless Power Transfer. Magnetic Coupling.

Sumário

1 INTRODUÇÃO 5

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 6

3 OBJETIVO 10

4 MODELO PROPOSTO E SIMULAÇÃO 10

5 PROTÓTIPO EXPERIMENTAL 16

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 19

7 REFERÊNCIAS 19

1 INTRODUÇÃO

A transmissão de energia elétrica sem fio ocorre sem uma conexão elétrica física, possibilitando um grande número de aplicações, do carregamento de celulares a operações espaciais [1] [2] [3] [4]. A habilidade de transmitir energia sem fio, de modo eficiente e seguro, pode revolucionar o modo como sistemas de energia são utilizados pelo mundo.

Essa tecnologia foi inicialmente desenvolvida por Nikola Tesla por volta dos anos 1880, com a criação da Bobina de Tesla [5]. Atualmente, existem três métodos de transmissão de energia sem fio: radiação eletromagnética, indução eletromagnética e acoplamento indutivo ressonante, sendo o acoplamento indutivo ressonante a opção mais estudada, por ser mais segura que as outras duas [6].

O método de transferência de energia elétrica sem fio utilizado nesta pesquisa será o acoplamento indutivo ressonante. Como explicado em [7] (tradução livre): *"Uma bobina transmissora, a qual é conectada a uma corrente alternada de alta frequência, gera um campo magnético que varia com o tempo. Por meio do acoplamento indutivo entre a bobina transmissora e a receptora, a voltagem induzida na bobina receptora carrega a carga, portanto, realizando a transmissão de energia elétrica sem fio. Além disso, uma capacitância distribuída ou externa é utilizada para criar uma topologia ressonante para uma maior eficiência."*

Assim como demonstrado no sumário, o relatório será dividido em tópicos. No item 2, iniciaremos com uma revisão bibliográfica da tecnologia. No item 3, falaremos sobre o objetivo deste projeto. Já no item 4, será descrito o modelo proposto e sua simulação computacional. No item 5, analisamos os protótipos físicos experimentais e, no item 6, serão feitas as considerações finais e conclusões sobre o projeto. Finalmente, no item 7, trazemos as referências bibliográficas utilizadas no relatório.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O método de acoplamento indutivo ressonante para transmissão de energia elétrica sem fio foi uma descoberta revolucionária realizada pelos pesquisadores do MIT em 2006, e publicada no artigo *Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances* [8]. Segundo o artigo publicado (tradução livre): “O acoplamento indutivo ressonante supera o problema da perda de eficiência devido à distância entre a bobina transmissora e a bobina receptora.”

Figura 1 Equipe do MIT que demonstrou experimentalmente a transmissão de energia elétrica sem fio por acoplamento indutivo ressonante

Antes disso, o método mais utilizado para a transmissão de energia elétrica sem fio era a Indução Eletromagnética. A figura 2 representa uma tabela [9] que mostra objetivamente a diferença entre Indução e Acoplamento indutivo ressonante (ressonância magnética):

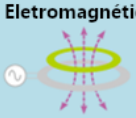
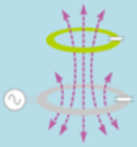
Princípio/Método			Distância de transferência	
Tipo não-radioativo Eficiência ○ Distância ×	Acoplamento de campo magnético	**Indução Eletromagnética** 	Até poucos cm	• Consiste de uma unidade amplificadora, uma bobina trsnmissora, uma bobina receptora, e uma unidade receptora • Baixo custo • A eficiência de transmissão diminui drasticamente quando a distância entre as bobinas transmissora e receptora aumenta • Ênfase colocada no fator de acoplamento do sistema
		Ressonância Magnética 	Até poucas dezenas de cm	• Um capacitor é inserido no lado da bobina transmissora assim como no lado da bobina receptora para formar um circuito ressonante LC • Tensão é transferida coincidindo a frequência de ressonância da bobina receptora com a bobina transissora • Mínima diminuição de eficiência de transferência devido à distância • Ênfase colocada no fator de qualidade das bobinas (Q)

Figura 2 Tabela comparando os métodos de indução eletromagnética e acoplamento indutivo ressonante (ressonância magnética) adaptada de [9]

No método do acoplamento indutivo ressonante (ressonância magnética), um capacitor é inserido em ambas as bobinas (transmissora e receptora) para formar um circuito ressonante. A energia elétrica é então transmitida de modo a que a frequência de ressonância coincida em ambos os lados. A figura 3 demonstra um circuito ressonante LC (indutor e capacitor), como descrito anteriormente.

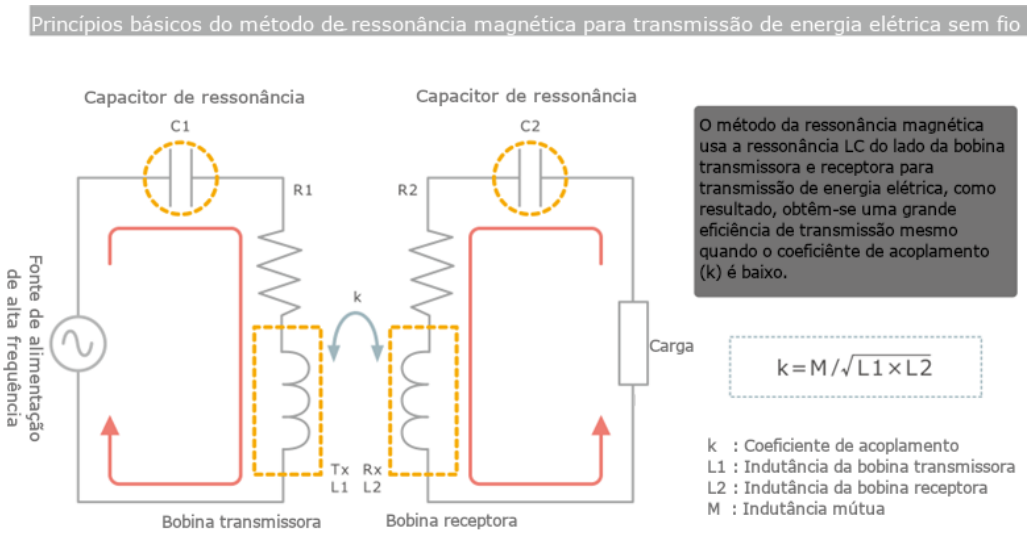


Figura 3 Esquematização de um circuito básico do método de acoplamento indutivo ressonante para transmissão de energia elétrica sem fio adaptada de [9]

Como descrito em [10]: “Nesse circuito, a energia oscila entre a bobina (que armazena energia no campo magnético) e os capacitores (que armazenam energia em um campo elétrico) em uma determinada frequência de ressonância.”

Para melhor observar a diferença da eficiência obtida pelo método de indutância magnética e pelo acoplamento indutivo ressonante, temos os seguintes gráficos mostrados na figura 4. Deles conclui-se que, mesmo que a distância entre as bobinas aumente e as bobinas se desalinhem, a eficiência pelo método de acoplamento indutivo ressonante se manterá mais alta e mais estável do que pelo método de indução magnética.

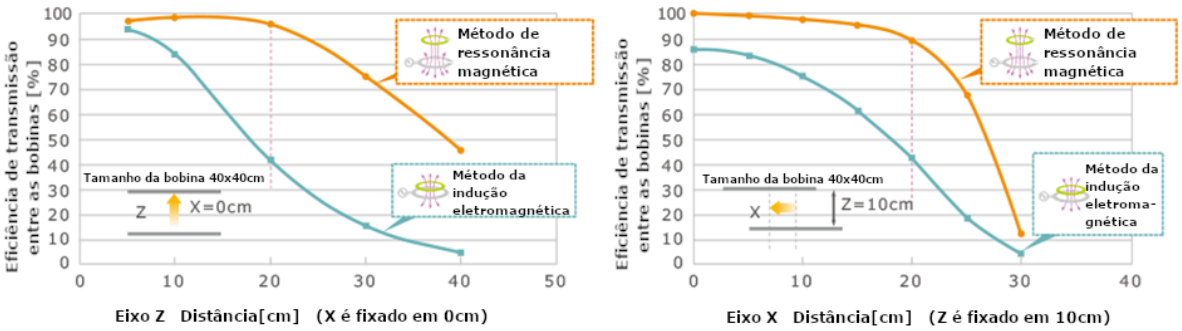


Figura 4 Comparação da distância entre as bobinas e a eficiência de transmissão pelo método de indução eletromagnética e o de acoplamento indutivo ressonante adaptado de [9]

A máxima eficiência de transmissão no método de acoplamento indutivo ressonante se dá pela equação 1, sendo k o coeficiente de acoplamento e Q o fator de qualidade da bobina. [9]

$$\boldsymbol{Eficiência Máx} = \boldsymbol{k \cdot Q} \qquad (\mathbf{1})$$

A equação 1 indica que, mesmo que o coeficiente de acoplamento seja baixo, a eficiência desejada pode ser obtida pelo aumento do fator de qualidade da bobina. O cálculo do k e do Q está expresso nas equações 2 e 3, respectivamente.

$$\boldsymbol{k} = \frac{\boldsymbol{M}}{\sqrt{\boldsymbol{L1 \cdot L2}}} \qquad (\mathbf{2})$$

$$\boldsymbol{Q} = \frac{\boldsymbol{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}}{\boldsymbol{R}} \qquad (\mathbf{3})$$

Sendo,

M: $indutância\ mútua$

$L1$: $indutância\ da\ bobina\ transmissora$

$L2$: $indutância\ da\ bobina\ receptora$

f: frequência de ressonância

L: $indutância\ da\ bobina$

R: $resistência\ da\ bobina$

Uma característica interessante do método de acoplamento indutivo ressonante para a transmissão de energia elétrica sem fio é que a eficiência máxima de transferência é obtida quando as bobinas estão a uma certa distância uma da outra, ou seja, diminuir a distância entre as bobinas pode reduzir a eficiência ao invés de aumentá-la. Isso ocorre porque a distância altera a indutância mútua e, consequentemente, o coeficiente de acoplamento e frequência de ressonância.

Tendo isso em mente, se a distância entre as bobinas variar, será necessário acoplar um circuito que fará a compensação da variação de distância para manter a eficiência.

3 OBJETIVO

O objetivo do projeto é analisar a arquitetura do método de acoplamento indutivo ressonante para a transferência de energia elétrica sem fio, identificando possíveis contribuições à tecnologia, considerando aspectos técnico-construtivos, de eficiência e econômicos. Será objeto de estudo a aplicação da tecnologia à energização de motores, embora, dada a sua versatilidade, também possam ser analisadas outras aplicações.

4 MODELO PROPOSTO E SIMULAÇÃO

Para facilitar o entendimento do modelo de circuito de acoplamento indutivo ressonante, faremos uma analogia ao circuito equivalente do transformador [11], ilustrado na figura 5. Isso se dá porque iremos utilizar a base do circuito equivalente do transformador e adicionar um capacitor em cada um dos lados para criar um circuito ressonante LC. Ter como base este circuito será de extrema importância no momento de equacionar o sistema, pois o circuito da figura 5 já nos dá a relação das forças eletromotrizes causadas pela taxa de variação temporal das correntes i_1 e i_2, e que, no modelo eletrodinâmico, são representadas por fontes controladas.

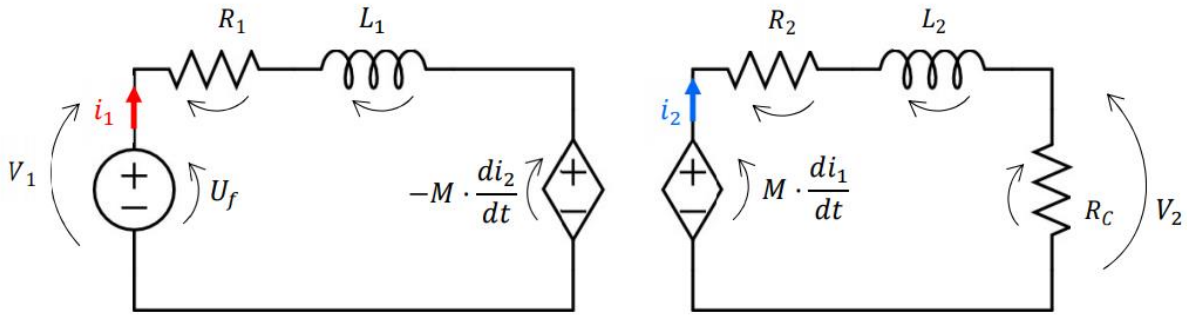


Figura 5 Circuito equivalente do transformador

O circuito equivalente demonstrado na figura 5 foi utilizado como base, adicionando-se apenas um capacitor em série em cada um dos lados. Para os valores de resistência, capacitância e indutância utilizados em um primeiro momento, a frequência de ressonância ótima foi de 7MHz. Com o intuito de validar o modelo, foram feitas simulações em Python e um protótipo físico. Porém, um elemento que não previmos foi que, para tal configuração, o gerador de sinais produzia uma corrente muito baixa, insuficiente para termos uma potência transmitida ao secundário que fosse alta o bastante para o acionamento de um motor. Portanto, enfrentamos dois desafios, o primeiro sendo que o gerador de sinais não possuía potência suficiente e o segundo que construir um circuito amplificador de corrente demandaria um custo alto para manter uma frequência de MHz. Assim, foi preciso redimensionar o sistema para utilizarmos uma frequência de ressonância mais baixa, que se adequasse aos limites dos componentes eletrônicos que estavam sendo utilizados e, deste modo, também seria possível continuar utilizando o gerador de sinais para alimentar o circuito.

Para solucionar esse problema, foi implementado um circuito de potência entre o gerador de sinais (figura 6) e a bobina primária, além de um retificador (figura 7) entre a bobina secundária e o motor.

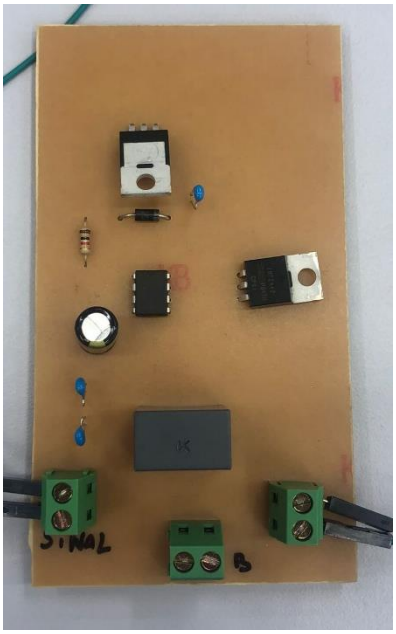


Figura 6 Circuito de Potência

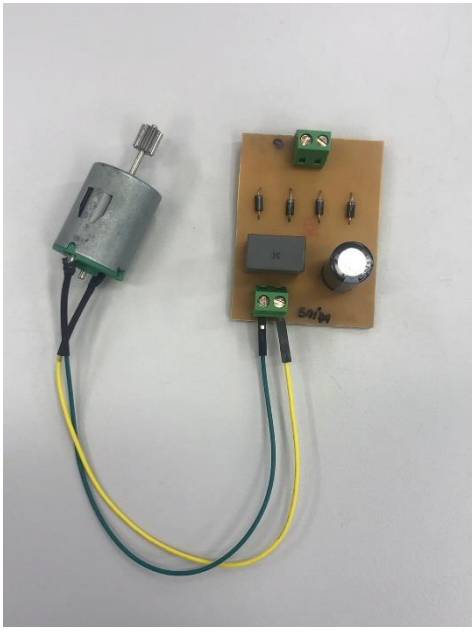


Figura 7 Circuito Retificador e Motor DC

Nas figuras 8 e 9 abaixo podemos ver os esquemáticos elétricos do circuito de potência e do retificador, respectivamente.

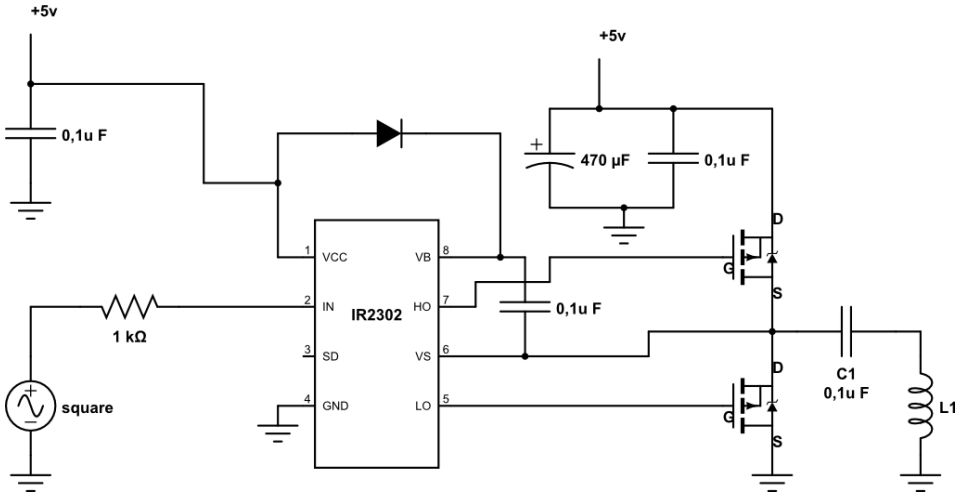


Figura 8 Elétrica do Circuito de Potência

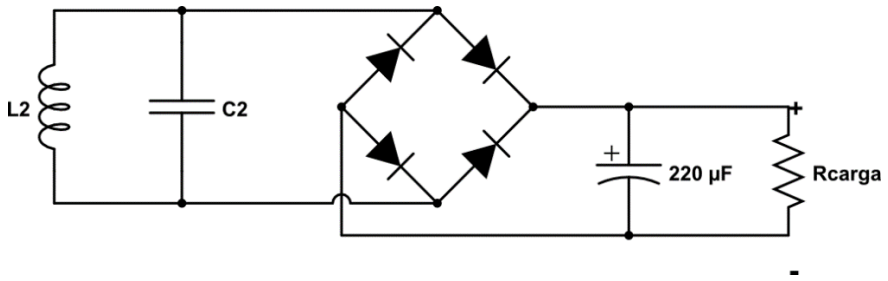


Figura 9 Circuito Elétrico do Retificador

Sintetizando, o sistema final será montado conforme o diagrama da figura 10.

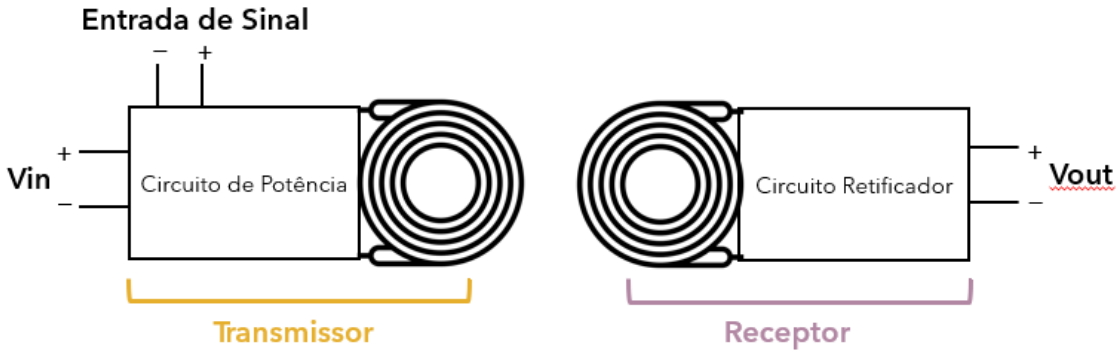


Figura 10 Diagramação do Sistema

Deste modo, alteramos o modelo a ser utilizado, como observado na figura 11 abaixo.

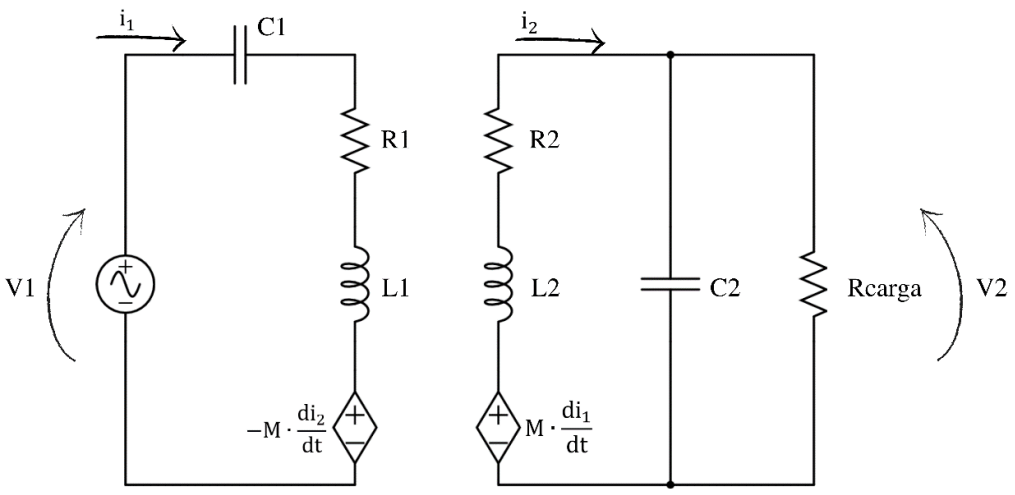


Figura 11 Circuito do modelo desenvolvido

Com base nesse circuito equivalente, aplicamos a segunda Lei de Kirchhoff a cada uma das malhas para chegar às equações 4 e 5, que modelam o sistema:

$$U_f = R_1 \cdot \hat{I}_1 + \hat{I}_1 \cdot \omega \cdot L_1 \cdot j + \hat{I}_1 \cdot \frac{1}{j \cdot C_1 \cdot \omega} - \hat{I}_2 \cdot j \cdot \omega \cdot M \qquad (\mathbf{4})$$

$$\hat{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot M - \hat{I}_2 \cdot R_2 - \hat{I}_2 \cdot j \cdot \omega \cdot L_2 - \hat{I}_2 \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{j \cdot C2 \cdot \omega} + \frac{j}{Rcarga \cdot \omega}\right)} = 0 \qquad (\mathbf{5})$$

Com o intuito de validar o modelo, foram feitas simulações em Python buscando entender como o circuito se comporta para diferentes frequências da fonte. Além disso, é possível analisar se o ganho da transmissão de energia aumenta ou diminui com diferentes coeficientes de acoplamento dessas bobinas.

Os valores medidos/considerados para modelar o circuito estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 Parâmetros para modelar o circuito

Sigla	Valores
R_C	10 Ω
C1, C2	0,1 pF
R1, R2	1,135 Ω (medido)
L1, L2	$196\mu H$ (medido)

Assim, determina-se a frequência de ressonância natural do circuito $\left(\frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}\right)$, que será de 36kHz.

Partindo para a simulação computacional do circuito, construímos alguns gráficos para analisarmos e validarmos o comportamento do sistema. Para tal, foi utilizada uma alimentação de 10V e um k de 0,11. Em relação à questão da tensão de alimentação, por estarmos utilizando equações fasoriais, é necessário trabalhar com a tensão da primeira frequência fundamental, uma vez que o sinal de entrada da bobina primária é quadrado, de 0 a 10V.

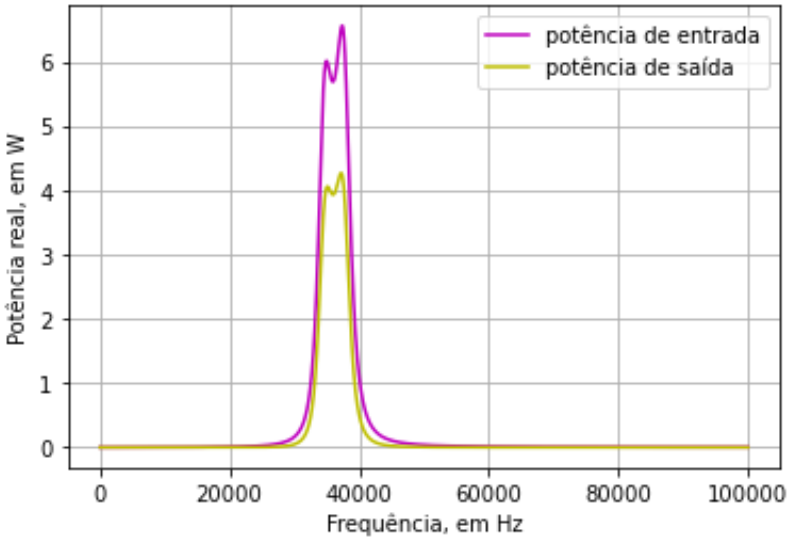


Figura 12 Gráfico de potência de entrada e de saída

Na figura 12, podemos observar uma potência máxima de saída de aproximadamente 4,3W, centrada na frequência de ressonância, transmitida a partir de uma potência de entrada de aproximadamente 6,7W. Observando-se,

na figura 13, o gráfico da eficiência em função da frequência, verifica-se que a frequência máxima também ocorre na frequência de ressonância.

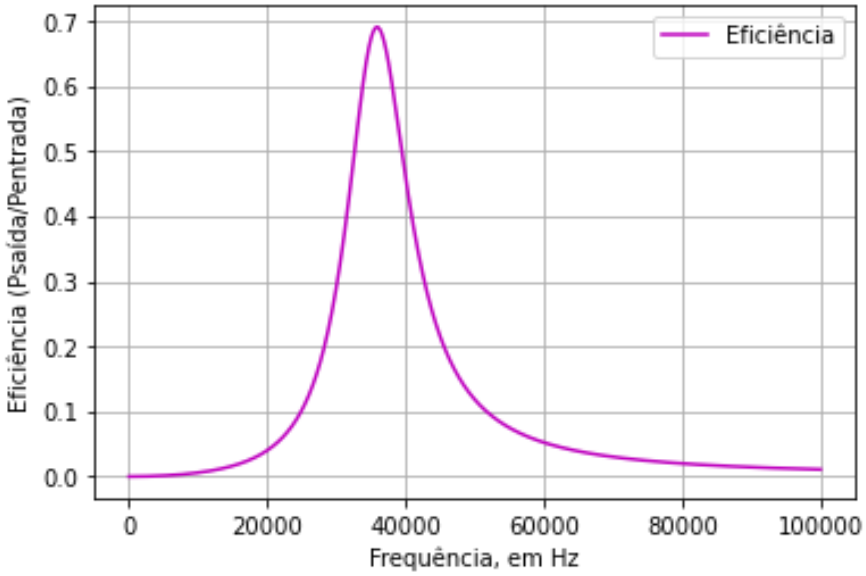


Figura 13 Gráfico de potência de entrada e de saída

Como a potência transmitida depende do acoplamento magnético e da frequência da fonte, o gráfico tridimensional (figura 14) ilustra a relação da potência com os valores de k e da frequência da fonte. A partir desse gráfico, é possível observar o comportamento do sistema em função da variação do k, ficando evidente que, de fato, o pico de potência ocorre em 36kHz, com um coeficiente de acoplamento de 0,1. É possível observar também que fora de um range de ressonância a potência recebida é desprezível.

É interessante observar que há uma combinação de k e frequência acima e abaixo da frequência de ressonância, como uma bifurcação à medida que k aumenta.

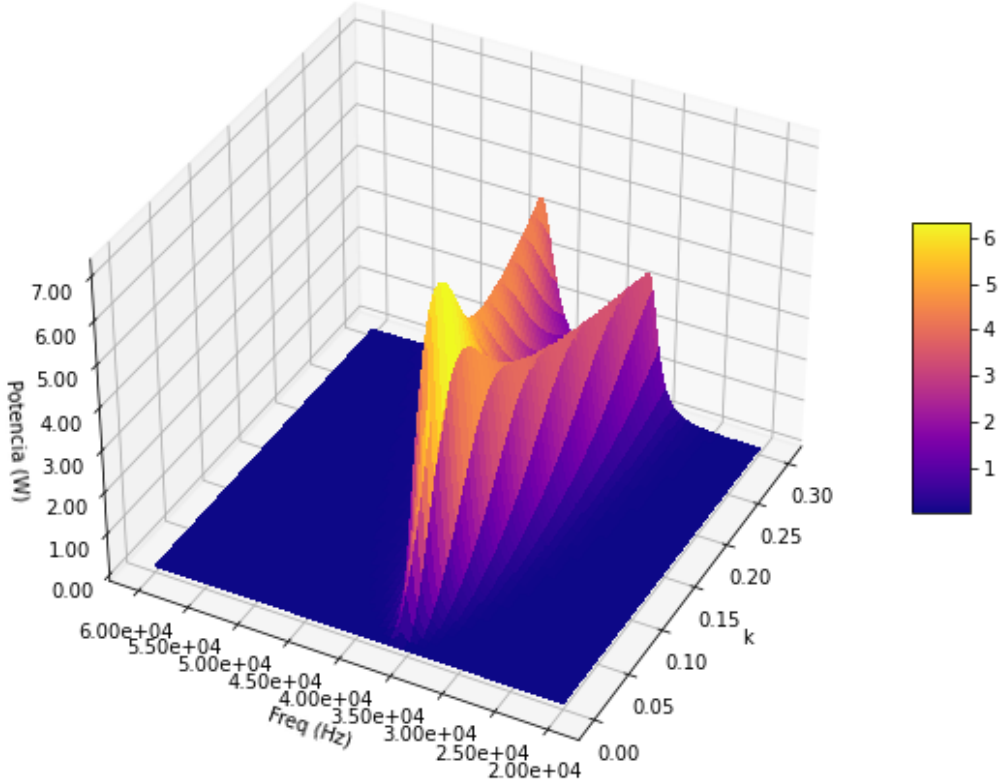
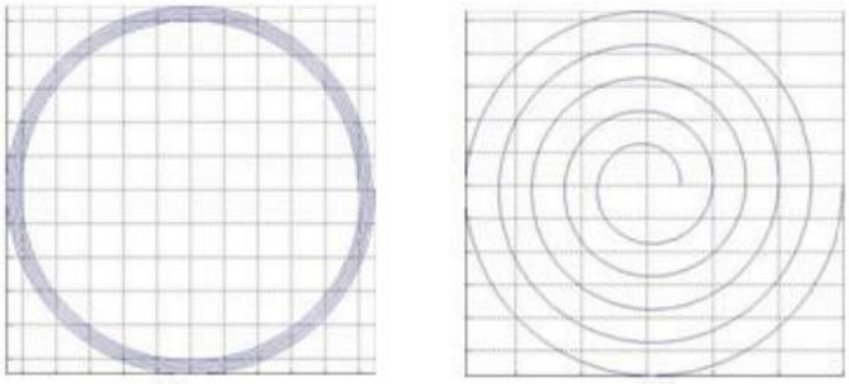


Figura 14 Gráfico de Potência x Frequência x Coeficiente de Acoplamento

5 PROTÓTIPO EXPERIMENTAL

O protótipo foi projetado a partir de [12] e das simulações feitas em Python. O design da bobina foi desenvolvido baseado em pesquisas prévias. Zierhofer [13] demonstrou que a distribuição das voltas pelo diâmetro, em vez de concentradas na circunferência, melhorava o coeficiente de acoplamento. Pode-se observar a mudança na figura 15.



(a) *(b)*

Figura 15 (a) voltas concentradas na circunferência (b) voltas distribuídas pelo diâmetro [13]

Em [14], discute-se que um menor número de voltas e um maior espaçamento entre os fios aprimoram o fator de qualidade das bobinas (Q) e, consequentemente, a eficiência.

Foram construídas duas bobinas de fio de cobre idênticas, sendo uma delas ilustrada na figura 16, atendendo ao requerimento da indutância desejada, mas buscando aumentar a eficiência da transmissão. Cada uma das bobinas tem vinte e quatro voltas, com os seguintes parâmetros:

$$Diâmetro\ Externo: 430mm$$
$$Diâmetro\ Interno: 210mm$$
$$Distância\ entre\ cada\ volta: 4{,}5mm$$

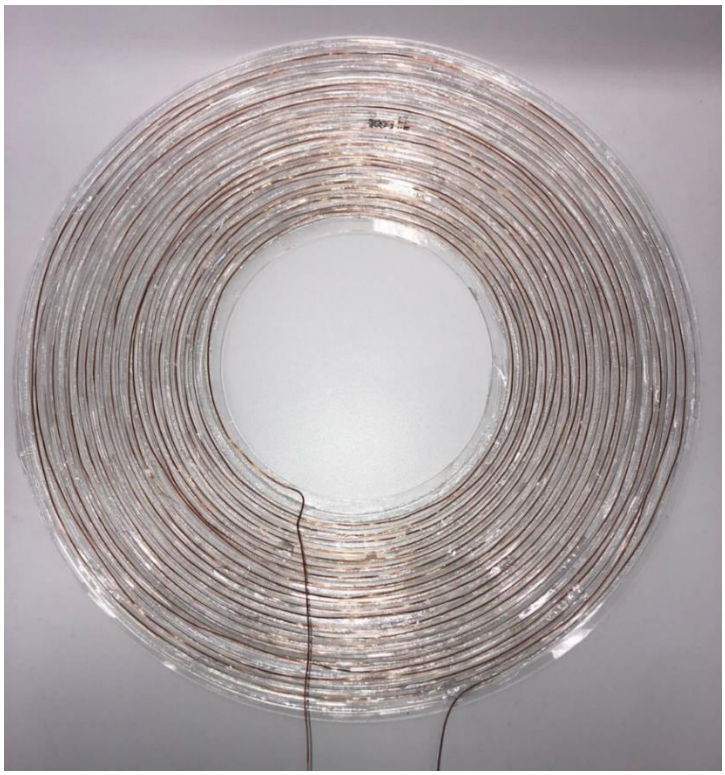


Figura 16 Design da Bobina Desenvolvida

O protótipo (figura 17) consiste de uma bobina primária conectada a um driver de corrente alimentado por uma fonte DC, e um gerador de sinais. A bobina secundária está conectada apenas a um circuito retificador que alimenta o motor DC.

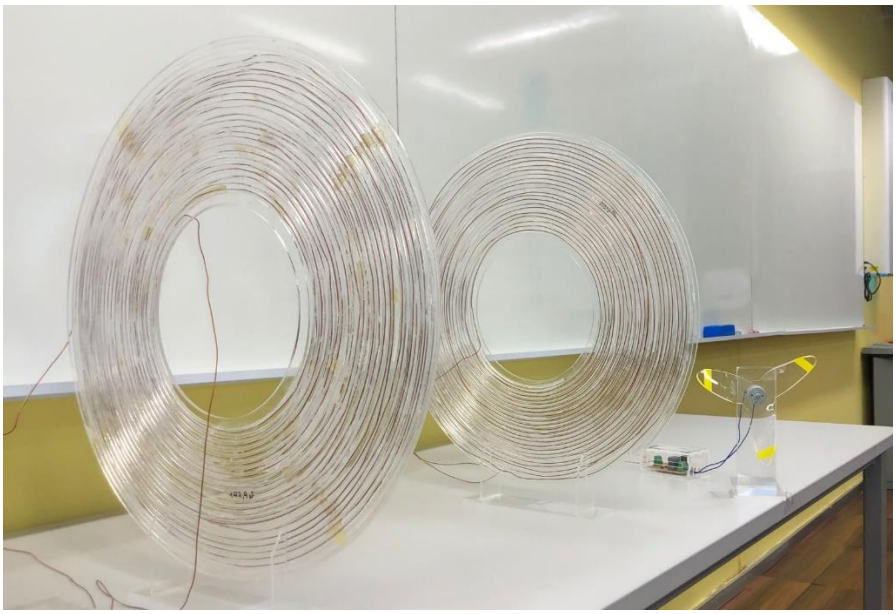


Figura 17 Protótipo Experimental de Transmissão de Energia Sem Fio

Para a validação do modelo proposto, comparamos as tensões de pico máximas em função de valores diferentes de carga, tanto para resultados como para dados experimentais. A figura 18 demonstra que o modelo é válido, sendo que foi necessário, para que o erro fosse mínimo, ajustar os valores de R1 e R2, uma vez que as medições desses parâmetros por meio de um LCR apresentam elevada incerteza. O fator de ajuste nas resistências foi de 1,24%, compatível com o aumento da resistência por efeito pelicular [15].

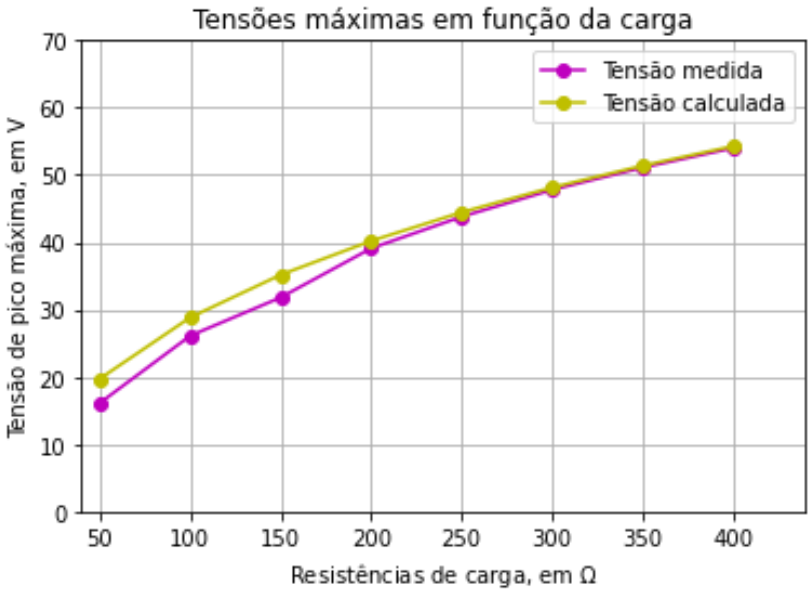


Figura 18 Gráfico de comparação entre as tensões máximas em função da carga medidas e calculadas

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o intuito de explorar e contribuir para uma melhor compreensão da transmissão de energia elétrica sem fio por acoplamento indutivo ressonante, um estudo de revisão bibliográfica foi realizado antes de iniciar os experimentos, com a leitura de artigos, reportagens e relatórios relacionados ao tema. Neste momento, também comparamos a transmissão por acoplamento indutivo ressonante com a transmissão por indução eletromagnética.

Em seguida, foi desenvolvido um modelo que explicasse e previsse o funcionamento do sistema, partindo-se de um modelo mais básico, como o do transformador. Assim, foram realizadas simulações computacionais em Python para avaliar o comportamento do modelo proposto, gerando resultados para a validação frente ao modelo real. Por fim, foi iniciada a prototipagem das bobinas e dos sistemas de potência e retificação. Neste processo, foram encontrados desafios, tais como a limitação do gerador de sinais e dos componentes disponíveis. Estes foram superados por uma série de iterações para a melhoria do projeto, atingindo uma maior distância de transmissão com uma maior potência, que fosse capaz de alimentar um motor DC.

Foi possível, assim, alimentar um motor DC de porte pequeno com uma distância de mais de 40cm entre a bobina primária (conectada no circuito de potência) e a bobina secundária (conectada apenas no retificador conectado ao motor). Deste modo, validamos o modelo e o protótipo para a transmissão de energia elétrica sem fio, abrindo caminho para futuros estudos na área.

7 REFERÊNCIAS

[1] BENDER, E., & MIT Industrial Liaison Program. (2014, October 28). **A world of wireless power.** Disponível em http://news.mit.edu/2014/world-wireless-power-witricity-1028. Acesso em 17. mai. 2020.

[2] **Wireless Power Transmission**. 2013. Disponível em: https://sbir.nasa.gov/content/wireless-power-transmission. Acesso em 18 mai. 2020.

[3] RAMOS, G. V., & YUAN, J. Wireless Power Transfer for Space Applications [PDF]. **National Aeronautics and Space Administration.**

[4] CHATTOPADHYAY, G., MANOHARA, H., MOJARRADI, M., Vo, T., MOJARRADI, H., Bae, S., & MARZWELL, N. (n.d.). Millimeter-Wave Wireless Power Transfer Technology for Space Applications [PDF]. **California Institute of Technology, USA.**

[5] RIM, C. T., & MI, C. Wireless power transfer for electric vehicles and mobile devices. **Wiley.** 2017.

[6] Y. Zhang, Z. Zhao and K. Chen, Frequency Decrease Analysis of Resonant Wireless Power Transfer. ***IEEE Transactions on Power Electronics***, vol. 29, no. 3, pp. 1058-1063, mar. 2014.

[7] SUN, L., MA, D., & TANG, H. **A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging.** 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118302247. Acesso em: 27 mai. 2020.

[8] KURS, André; KARALIS, Aristeidis; MOFFATT, Robert; JOANNOPOULOS, J. D; FISHER, Peter; SOLIJACIC, Marin. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. Research Articles. **Science**, *Science* 06 Jul 2007: Vol. 317, Issue 5834, pp. 83-86 DOI: 10.1126/science.1143254, jul. 2006.

[9] Magnetic Resonance Method od Wireless Power Transfer Technology for Industrial Equipment. **TDK Developing Technologies**. Disponível em: https://product.tdk.com/info/en/techlibrary/developing/wireless/index.html. Acesso em: 27 mai. 2020.

[10] AGCAL, ALI; OZCIRA, Selin; BEKIROGLU, Nur. **Wireless Power Transfer by Using Magnetically Coupled Resonators.** 2015. Disponível em: https://www.intechopen.com/books/wireless-power-transfer-fundamentals-and-technologies/wireless-power-transfer-by-using-magnetically-coupled-resonators. Acesso em: 27 mai. 2020

[11] D. E. Johnson and D. E. Johnson, Eds., **Electric circuit analysis**, 3rd ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 1997.

[12] SAMPLE, Alason P.; MEYER, David T.; SMITH, Joshua R. **Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer.** 2010.

[13] Zierhofer, C.M.; Hochmair, E.S., "**Geometric approach for coupling enhancement of magnetically coupled coils**," Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, vol.43, no.7, pp.708-714, July 1996.

[14] Ng, D.C.; Boyd, C.; Bai, S.; Felic, G.; Halpern, M.; Skafidas, E., "**High-Q flexible spiral inductive coils**," Electromagnetic Compatibility Symposium - Melbourne (EMC Melbourne), 2010, pp.1-4, 8-10 September 2010.

[15] Donaghy-Spargo, C. M., and A. B. Horsfall. "**Transient Skin Effect in Power Electronic Applications**." *Durham Research Online*, IET, 30 June 2019, https://dro.dur.ac.uk/25704/.