



Transmissão de energia elétrica sem fio em baixa potência

Glaysson Junio¹; Victor Henrique Siqueira de Jesus²; Vinicius Lopes de Lima³;

juninhogias@gmail.com)¹, victorh.sqr@gmail.com)², viniciuslopesdelima@hotmail.com)³

Professora orientadora: Sergio Ribeiro Silva

Coordenação de curso de Engenharia Elétrica

Resumo

Neste trabalho apresenta-se a teoria eletromagnética fundamental que dá suporte à tecnologia de transmissão de energia sem fio. Além dessa teoria apresenta-se também a fundamentação dos circuitos elétricos ressonantes que servem de unidade básica para transmissor para sistemas de transmissão sem fio de alta eficiência. Aplicações e desenvolvimentos recentes desta tecnologia são apresentados. Por fim é realizado o estudo de um sistema com acoplamento magnético visando transferência de energia através de simulação computacional. O estudo mostra que estes sistemas são aplicáveis e vantajosos em uma gama de aplicações específicas, apresentando também desvantagens que impedem seu uso seja amplamente disseminado tal como as formas de transmissão de energia tradicionais.

Palavras-chave: Transmissão de energia sem fio; *Wireless Power Transfer* (WPT); Indução; Eletromagnetismo; Ressonância.

1. INTRODUÇÃO

A transmissão de energia sem fio ou *Wireless Power Transfer*, é uma tecnologia de transferência de energia elétrica sem a utilização de cabos ou qualquer contato direto entre a fonte e a carga, e é realizada por meio de ondas eletromagnéticas que possibilitam a um dispositivo emissor transfira energia elétrica a um dispositivo receptor.

Na década de 1890 o engenheiro eletrotécnico e engenheiro mecânico sérvio, Nikola Tesla, criou uma das suas maiores invenções, a Bobina de Tesla, a qual é um

dispositivo transmissor de eletricidade sem fios, utilizando-se do princípio da ressonância elétrica (Tesla,2012), seu objetivo era que a energia sem fio fosse distribuída para o mundo. Levando-se em consideração a tecnologia e cultura da população nesse período da história, essa inovação não fora utilizada em nível comercial e industrial, mas os estudos realizados por Tesla ao longo dos anos se tornaram a base para muitos conceitos científicos e para novas aplicações comerciais da transmissão de energia sem fio.

Observa-se que, indiretamente, os estudos relacionados ao tema não se iniciaram por Nikola Tesla. Na década de 1830, Michael Faraday, físico e químico inglês, descobriu em seus experimentos que um campo magnético poderia gerar uma corrente elétrica. Ele disse que uma força eletromotriz é produzida por condutores elétricos em movimento num campo magnético uniforme, ou então pode ser produzida por um campo magnético variante no tempo (HAYT, 1983).

$$fem = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Onde:

fem = Força Eletromotriz (V);

Φ = Fluxo magnético;

t = Tempo.

Anos mais tarde, James Clerk Maxwell estudou o experimento de Faraday, e escreveu a sua lei na forma diferencial:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

Onde:

∇ = Operador Nabla;

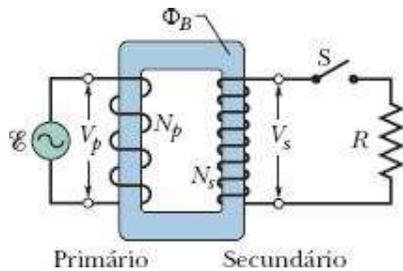
E = Campo elétrico;

B = Campo magnético;

Ou seja, o rotacional do campo elétrico é igual ao oposto da variação do campo magnético no tempo (DEL TORO, 1999).

Este princípio da indução eletromagnética é utilizado em transformadores elétricos, geradores, motores e máquinas de indução em geral, conforme a figura 1.

Figura 1 - Transformador elétrico.



Fonte: HALLIDAY, RESNICK e WALKER, p. 689, 2016

Com a evolução do complexo sistema de geração, transmissão e distribuição a energia elétrica pode ser distribuída. Ela é atualmente utilizada em praticamente todas as residências, comércios e indústrias ao redor do mundo, além de automóveis elétricos, equipamentos eletrônicos, motores elétricos, computadores, transmissão dados e voz em banda larga, para a fabricação de produtos industrializados e para a iluminação.

A energia sem fio também é vista como um desenvolvimento tecnológico sustentável, além de não ser necessária a utilização cabos, permite que sistemas elétricos fiquem mais compactos, contribuindo para outras fontes de energia limpa.

Com o intuito de avaliar quais características devem ser consideradas para garantir eficiência em uma transferência de energia limpa e eficaz através de ondas eletromagnéticas, este projeto, portanto, tem como objetivos apresentar a teoria eletromagnética básica dos sistemas de transmissão de energia sem fio e dos sistemas ressonantes, bem como desenvolver uma simulação computacional para estudar o funcionamento de um desses sistemas a nível de circuito elétrico.

Foram traçados como objetivos específicos os seguintes tópicos:

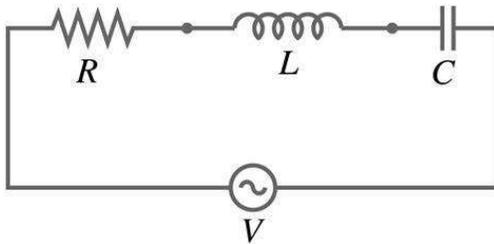
- Apresentar de forma sucinta a teoria eletromagnética de e de circuitos necessária ao entendimento do tema;
- Realizar simulações com o circuito ressonante;
- Analisar a capacidade de transmissão com diferentes fatores de acoplamentos magnéticos;

- Analisar resultados das simulações obtidas variando seus parâmetros;

2. DESENVOLVIMENTO

Para que haja transferência de energia de forma mais eficiente, faz-se necessário que o circuito RLC seja ressonante. Na figura 2 observa-se o exemplo de um circuito RLC que, excitado em uma determinada frequência específica apresenta características de ressonância.

Figura 2 – Circuito RLC em série.



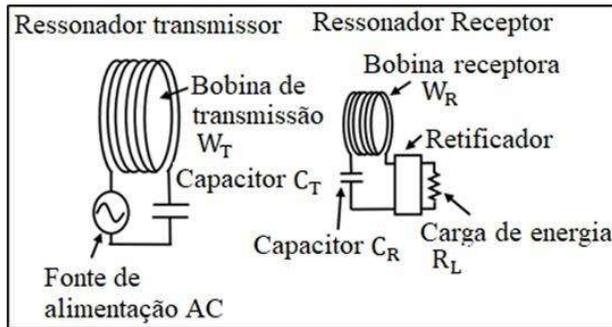
Fonte: Elaborado pelos Autores

A ressonância é, por definição, a frequência natural que um corpo ou sistema recebe e/ou transfere energia de forma mais eficiente. Essa frequência é uma característica intrínseca de cada sistema físico. Em sistemas mais complexos, como por exemplo, um automóvel, uma ponte ou uma corda de violão, observa-se a apresentação de muitas frequências naturais de vibração. Caso seja dada energia a um desses sistemas em uma de suas frequências naturais de vibração, eles irão oscilar intensamente (Zumpano, 2004)

Existem vários tipos de ressonância: mecânica, elétrica, magnética, etc. A ressonância magnética é gerada se a frequência de certo campo magnético for igual à frequência de ressonância magnética do corpo, desta forma o corpo começará a vibrar.

A tecnologia de transmissão de energia elétrica através da indução magnética e sistemas ressonantes, conforme Figura 3, funciona de forma bem simples, e consiste de um circuito emissor que contenha bobinas geradoras de campo magnético e outro circuito receptor que tenha bobinas captadoras deste campo.

Figura 3 - Estrutura básica de energia sem fio de acoplamento indutivo ressonante transferência (RIC-WPT)



Fonte: KOYAMA, 2017 (Editado pelos autores)

Segundo Jiang (2017), a ressonância do circuito define-se como a equivalência em módulo entre as reatâncias indutivas e capacitivas do circuito reduzindo-se, assim, os valores de impedância do circuito, havendo maior transferência de energia. Para que esse conceito seja entendido de forma eficaz, faz-se necessário o entendimento dos seguintes conceitos:

2.1.1 Reatância Capacitiva

Quando se aplica tensão alternada sobre um capacitor em circuito fechado, há a geração de uma reatância, de característica capacitiva. Ou seja, a diferença de potencial presente nos terminais do capacitor se opõe à tensão da fonte, gerando-se, conseqüentemente, atraso na tensão da fonte ou, adiantamento da corrente, de valor X_C , conforme a equação 3:

$$X_C = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)} \quad (3)$$

Onde:

X_c: Reatância capacitiva

f : Frequência aplicada

C : Capacitância

Nessa relação matemática é possível observar que, quando o circuito trabalha em frequências elevadas, o X_C tende a 0, enquanto em frequências mais baixas, tende ao infinito.

2.1.2 Reatância Indutiva

Em tensão alternada ocorre a variação no sentido da corrente e, considerando-se que ocorre indução de corrente na bobina, há, também a geração de tensão induzida em sentido a se opor a esta variação, as quais provocam atraso na corrente, ao contrário do que acontece com o capacitor. Tendo em vista esse conceito, obtemos a reatância indutiva, definindo-se como a oposição da passagem de corrente, causada pelo indutor.

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (4)$$

Onde:

X_L = Reatância indutiva

f = Frequência

L = Indutância

Inversamente ao que acontece na equação 3, o produto demonstrado na equação 4, determina que, quanto maior a frequência (f), maior a reatância indutiva (X_L)

2.1.3 Impedância

Também denominada como a oposição da passagem de corrente, a impedância é representada através de números complexos, em sua forma retangular e polar. Pode-se, também, representá-los em números reais, conforme a equação 5:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (5)$$

Onde:

Z = Impedância

R = Resistência equivalente do circuito

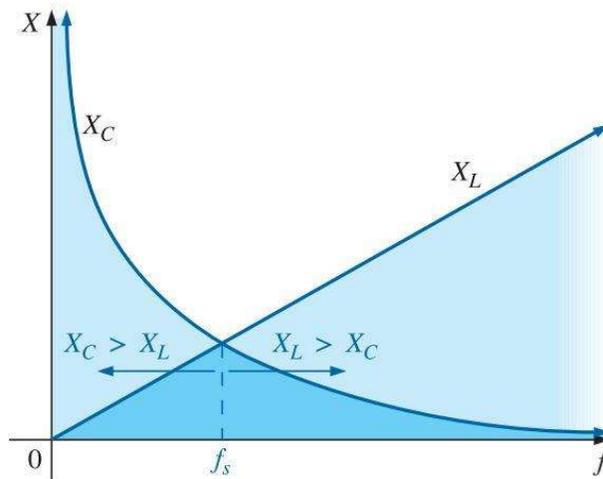
X_L = Reatância indutiva

X_C = Reatância capacitiva

No caso da impedância, quanto menor a diferença entre a indutância capacitiva (X_C) e a reatância indutiva (X_L), mais resistivo o circuito encontra-se.

Utilizando-se dos conceitos acima, é possível compreender a importância da frequência para se alcançar a ressonância, uma vez que a reatância indutiva e a reatância capacitiva dependem diretamente e inversamente, respectivamente, da frequência do circuito.

Figura 4 - Gráfico Resistência x Frequência.



Fonte: BOYLESTAD, 2004

2.1.4 Ressonância

Como exemplo, suponha-se que uma tensão CA fixa de frequência variável seja aplicada a um circuito RLC em série. À medida que a frequência da tensão aplicada aumenta, a reatância indutiva X_L aumenta, mas a reatância capacitiva X_C diminui. Pode-se observar no gráfico explicativo sobre a resistência x frequência (Figura 4), o qual demonstra a frequência de ressonância equivalente a $X_L = X_C$

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (6)$$

Onde:

f_r = Frequência de ressonância;

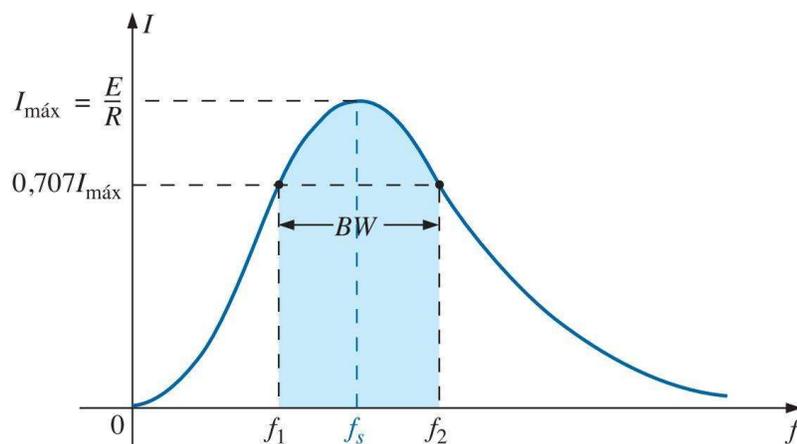
C = Capacitância, em farads;

L = Indutância, em henrys.

Em função disso, observa-se na figura 5, a qual faz referência à relação ao circuito ressonante e a condição a qual possui-se o maior valor de corrente, que:

- A frequência é utilizada de forma variada e os valores de corrente nas múltiplas frequências aplicadas foram plotadas no gráfico.
- A magnitude da corrente é controlada pela frequência, ou seja, é uma função da mesma.
- A curva apresenta resposta a partir do ponto zero, atinge valores máximos na frequência de ressonância e aproxima-se de zero quando a frequência se eleva à próximo do infinito.
- Na frequência ressonante, obtém-se, em sua a jusante e a montante, ou, em suas passagens de banda, valores de corrente próximos ao máximo.
- Além disso, o circuito pode ser utilizado como isolante e filtro de certas frequências.

Figura 5 – Curva de resposta em frequência para um circuito RLC.

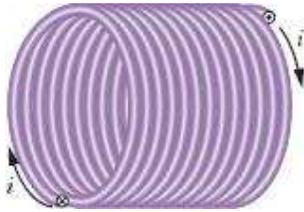


Fonte: BOYLESTAD, 2004

2.1.5 Indutância da bobina solenóide

Para calcular a indutância da bobina utilizada, é necessário utilizar a equação 7, a qual demonstra que há relação entre o número de espiras e sua seção em relação ao comprimento do enrolamento, medido em cm.

Figura 6 – Bobina solenóide



Fonte: HALLIDAY, RESNICK e WALKER, p. 529, 2016

$$L = 1,256 \cdot \frac{S \cdot n^2}{c} \cdot 10^{-8} \quad (7)$$

Onde:

L = Indutância da bobina, em Henry;

S = Área abrangida por uma espira, em cm²;

c = Comprimento do enrolamento em cm;

n = Número de espiras da bobina.

E ainda, para calcular a área da bobina (S) utiliza-se a equação da área de uma circunferência, ou seja:

$$S = \pi \cdot R^2 \quad (8)$$

Onde:

S = Área abrangida por uma espira, em cm²;

R = Raio da bobina, em cm.

No caso do comprimento, pode-se realizar o produto entre o diâmetro do fio utilizado e o número de espiras da bobina.

$$c = d \cdot n \quad (9)$$

Onde:

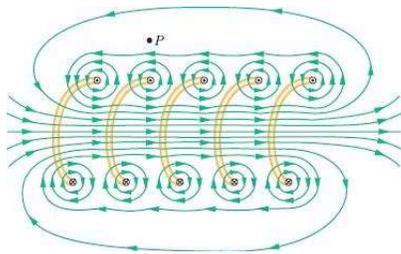
d = Diâmetro do fio utilizado, em cm;

n = Número de espiras da bobina.

c = Comprimento do enrolamento em cm;

2.1.6 Campo magnético em uma bobina solenoide

Figura 7 – Seção reta de um trecho “esticado” de um solenoide



Fonte: HALLIDAY, RESNICK e WALKER, p. 530, 2016

$$\mathbf{B} = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot i}{L} \quad (10)$$

Onde:

B = Módulo do vetor campo magnético, (T);

μ_0 = Permeabilidade magnética no vácuo ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$);

i = Corrente, em amperes;

L = Comprimento da solenoide em metros;

N = Número de espiras da bobina

2.1.7 Campo magnético por uma bobina espira circular

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad (11)$$

Onde:

B = Módulo do vetor campo magnético, em Tesla;
 μ_0 = Permeabilidade magnética no vácuo ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$);
i = Corrente, em ampere;
R = raio do solenoide, m.

Como demonstrado na Figura 3, uma espira conectada a uma fonte de corrente alternada, emite o campo magnético, e uma espira receptora “captura” o fluxo. O aparelho emissor deve estar conectado a uma fonte de tensão alternada para poder gerar um campo magnético variante. O aparelho receptor, ao sofrer influência deste campo, começa a produzir corrente elétrica através do fenômeno da indução magnética. (KOSOW, 2005)

O presente trabalho, portanto, considera-se o levantamento de dados relativos à transmissão de energia elétrica através indução magnética, visando ampliar a análise do mesmo na pesquisa bibliográfica.

O princípio da indução eletromagnética é, há muitos anos, vastamente utilizado em diversas áreas e propósitos: máquinas elétricas, transformadores etc. Nos transformadores, por exemplo, a transferência de potência ocorre por acoplamento das linhas de fluxo magnético em um caminho de alta permeabilidade magnética, proporcionando altos rendimentos. Embora, na prática, a solução exata não seja frequentemente alcançada, muitas vezes diversas suposições simplificadoras são consideradas. Para maior clareza dos conceitos físicos que serão utilizados no decorrer deste trabalho, faz-se necessária uma breve introdução da teoria eletromagnética, que servirá de base para o estudo das técnicas utilizadas para a transmissão de energia. A seguir, uma resumida explicação do acoplamento indutivo é apresentada, baseando-se majoritariamente na literatura composta por A. E. Fitzgerald (2006).

Desprezando a corrente de deslocamento, obtém-se a equação de Maxwell que relaciona as correntes com os campos magnéticos:

$$\int_C H \cdot dl = \int_S J \cdot da \quad (12)$$

A Equação mostra que a integral de linha da componente tangencial da intensidade de um campo magnético \mathbf{H} ao longo de um caminho fechado \mathbf{C} é igual a corrente total que passa através da superfície \mathbf{S} , delimitada por esse caminho. Portanto, nota-se que a origem de \mathbf{H} é a densidade de corrente \mathbf{J} . Sabe-se ainda, que a intensidade do campo magnético \mathbf{H} produz uma densidade de fluxo magnético \mathbf{B} , relacionados pelas características do meio μ , chamada de permeabilidade do meio, como mostrado na Equação a seguir:

$$B = (\mu_r \cdot \mu_0 \cdot H) \cdot \frac{Wb}{m^2} \quad (13)$$

Onde a permeabilidade do meio (μ) pode ser especificada por uma constante (μ_r) em relação à permeabilidade do espaço livre (μ_0).

O fluxo magnético (ϕ) pode ser definido, então, pela integral da superfície \mathbf{S} da componente normal da densidade de fluxo magnético, como segue:

$$\Phi = \int B \cdot da \quad (14)$$

No sistema internacional de unidades, a unidade de ϕ é o Weber (Wb).

Relacionando o resultado obtido para o fluxo magnético com a lei de Faraday, é possível demonstrar que a variação de um campo magnético no tempo produz um campo elétrico no espaço. Essa relação é mostrada na Equação:

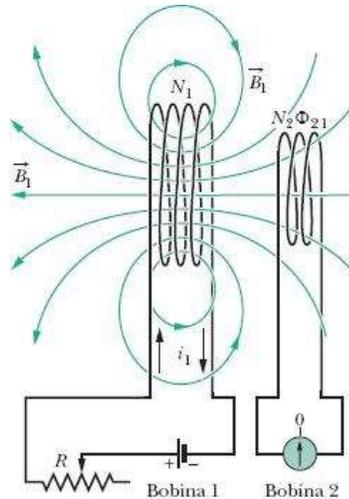
$$\int_c E \cdot ds = - \frac{d}{dt} \int_s B \cdot da = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (15)$$

Assim, a intensidade de um campo elétrico \mathbf{E} em um contorno fechado \mathbf{C} é igual à razão no tempo da variação do fluxo magnético através deste contorno.

Considerando agora um circuito com duas bobinas próximas de N_1 e N_2 espiras, como mostrado na Figura 8 abaixo, correntes variáveis nos dois enrolamentos, $I_1(t)$ e $I_2(t)$, produzem variações de fluxos magnéticos próprio, $\phi_{L1}(t)$ e $\phi_{L2}(t)$, de acordo com as respectivas indutâncias de cada enrolamento. Entretanto, as linhas de campo magnético

produzidas pela corrente de uma bobina também atravessam a superfície da outra, induzindo tensões mútuas.

Figura 8 – Indução mútua



Fonte: HALLIDAY, RESNICK e WALKER, p. 608, 2016

Esse fenômeno é chamado de Indutância Mútua, que é a medida, em Henrys, do acoplamento indutivo entre as bobinas (M). Assim, uma corrente $i(t)$ que entra num terminal em um enrolamento induz uma tensão $M\frac{di}{dt}$ no outro enrolamento. (A. E. Fitzgerald, 2006).

Para se alcançar a transmissão de energia WPT (*Wireless Power Transfer*) existem duas tecnologias que são elas: Near-field (*campo próximo*) e Far-field (*campo distante*). O primeiro método trabalha com acoplamento indutivo e acoplamento indutivo ressonante, já o segundo método trabalha acerca de radiação, micro-ondas e lasers (T. S. Chandrasekar Rao, 2016).

2.2.1 Método de transmissão Near-Field e Far-Field

No método Far-field o campo eletromagnético tem uma razão inversa em relação a distância, ou seja, a intensidade do campo magnético terá seu módulo pouco reduzido ao se afastar o emissor do receptor. Já no método Near-field a intensidade desse campo se reduzirá muito mais rapidamente conforme aumenta-se essa distância.

Segundo J. Garnica (2013), Shinohara (2014) e Sazonov (2014), no meio de transmissão Far-field os campos eletromagnéticos se retroalimentam no espaço, fazendo

que a existência de um campo B se dê quase por completo devido a existência de um outro campo E naquele espaço. Porém no Near-field eles atuam de forma individual, sendo exclusivamente existentes através da fonte do emissor.

De acordo com Qiang (2011) e Zhuo (2014), os principais fatores que impactam na eficiência e capacidade de transmissão de eletricidade pelo ar são a distância e disposição entre o emissor e os receptores e também a qualidade do material empregado na construção, sendo que a disposição das bobinas é diretamente ligada ao fator de acoplamento (**k**), essa disposição afeta diretamente na indutância mútua das bobinas e altera esse fator como mostra a fórmula a seguir:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L1 * L2}}$$

Onde:

k= fator de acoplamento

M= Indutância mútua entre as bobinas

L1= Indutância da bobina emissora

L2= Indutância da bobina receptora

Esse fator de acoplamento foi utilizado pelo software de simulação *LT Spice* e é o que indica a qualidade da transmissão variando de 0 a 1. Pode-se fazer um paralelo direto com a equação que descreve a influência do campo magnético na bobina secundária, a qual depende do ângulo entre essas duas mesmas bobinas. Isso significa que quanto mais próximo de 1 mais energia está sendo transmitida e maior está sendo a eficiência do sistema, e quanto mais próximo de 0 menor a eficiência e menor a quantidade de energia transmitida. Em casos nos quais o fator de acoplamento está baixo existem algumas formas de melhorar a transmissão, sendo ela reposicionando os dispositivos emissores e receptores, diminuindo a distância entre eles ou modificando sua construção física.

2.3.1 Aplicabilidade, vantagens e desvantagens

A transmissão de energia elétrica WPT é de ampla aplicabilidade onde se tem dificuldade no uso de cabos ou até mesmo onde até então a transmissão era impraticável. Zhu (2015) traz que essa tecnologia já é encontrada em diversos meios como o

aeroespacial, em máquinas elétricas, em dispositivos médicos e também em outros meios onde a tecnologia tem se desenvolvido.

De acordo com Jacobs (2010), as maiores vantagens dessa tecnologia estão empregadas onde se requer maiores mobilidades e que são prejudicadas pela limitação do contato elétrico direto, sendo os eletrônicos portáteis como área em maior desenvolvimento seguido da medicina. Alguns exemplos de onde esse método de transmissão já está empregado nos eletrônicos portáteis são em fones de ouvido, relógios inteligentes, carregamento de aparelhos por indução, caixas de som, transmissão de energia entre dispositivos, dentre outras aplicações.

Fabricantes de aparelhos eletroeletrônicos já lançaram alguns dispositivos no mercado, sendo um bom exemplo a Samsung, empresa fabricante de smartphones, smartv's e outros dispositivos eletrônicos. A Samsung desenvolveu um carregador próprio por indução que suporta até dois dispositivos conectados ao mesmo tempo (Silva, 2018). De acordo com Ahire (2017), outras áreas também já utilizam desse meio de transmissão, como o automobilístico que utiliza do carregamento de carros elétricos por indução, também a medicina que emprega esse meio nos implantes como marca-passos, desfibriladores, implantes ortopédicos artificiais, dentre várias outras aplicações. Nos marca-passos por exemplo, fazia-se necessário uma intervenção cirúrgica a cada substituição da bateria interna do implante, hoje com o uso da transmissão wireless esse carregamento em alguns casos é realizado de forma remota, aproximando o emissor da bateria presente no implante, e assim essa bateria é carregada sem a necessidade cirúrgica ou de contato direto com a bateria (Ho, Kim e Poon, 2012).

A transmissão de energia wireless traz diversas vantagens para o mercado, sendo alguns exemplos, a redução dos riscos aos humanos que assim ficam menos expostos a contato com cabos elétricos, reduzindo o risco de choque elétrico. O aumento da vida útil dos dispositivos, pois quando sem utilização o sistema entra em stand-by. A possibilidade de haver mais de um receptor para um mesmo emissor e a viabilidade no mercado de veículos elétricos. Apesar de todas as vantagens essa tecnologia também traz consigo algumas desvantagens contundentes que ainda impossibilitam que esse tipo de transmissão seja mais amplamente utilizado, sendo alguns exemplos o custo de desenvolvimento e operação, visto que são de montagens ainda complexas e requerem precisão. Há ainda o problema da baixa eficiência em distâncias superiores a 20cm entre receptor e emissor, causa algumas interferências no setor automotivo quando utilizada em frequências de rádio e pode também causar efeitos colaterais em seres humanos e animais

em caso de utilização em frequências não estabelecidas pela norma (de Castro, 2021). A norma IEEE C95.1-2019 foi desenvolvida com o intuito de orientar quanto os limites de frequência que podem ser utilizados nesse meio, visando evitar que os seres humanos e também os animais sofram efeitos colaterais pela utilização desse meio, a única exceção é por parte de tratamentos médicos onde se faça necessário o uso de frequências específicas.(de Castro, 2021).

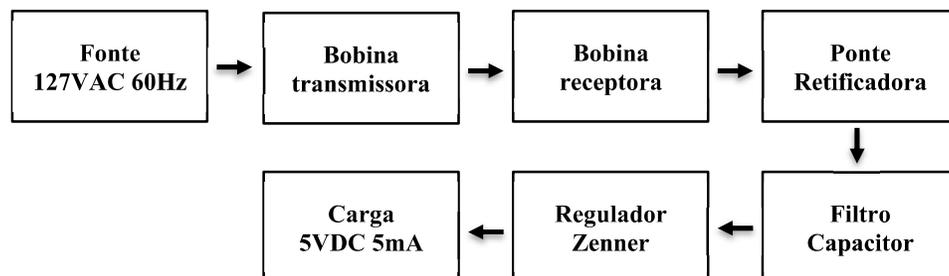
3. METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida através da revisão bibliográfica acerca da teoria fundamental que dá suporte à transmissão de energia elétrica sem fio e a realização de simulação computacional de um circuito elétrico com acoplamento magnético. As simulações visam demonstrar a transmissão de energia através do acoplamento entre duas espiras. A simulação da configuração geométrica do campo magnético no espaço não é alvo da simulação realizada.

A entrada do circuito em 127V/60Hz, alimenta a bobina no circuito primário. Este foi posto em ressonância para obter melhor eficiência. O acoplamento da bobina do transmissor e receptor é realizado através de fator de acoplamento entre duas espiras. No circuito secundário a tensão é retificada por uma ponte retificadora de onda completa, depois passa por um filtro capacitivo e por fim em um regulador de tensão Zenner gerando uma tensão constante de 5VDC com corrente de 5mA. Com a tensão contínua fornecida pelo circuito receptor é possível realizar o carregamento de baterias de dispositivos como celulares, marca-passo, entre outros.

O diagrama de blocos do circuito simulado é apresentado abaixo. A simulação foi conduzida totalmente a nível de circuito elétrico (não foi simulada a configuração do campo no espaço) utilizando o software LTSpice XVII.

Figura 9 – Diagrama de circuito ressonante transmissor e receptor.



Fonte: Elaborado pelos Autores

4. RESULTADOS E DISCUÇÕES

4.1.1 Dedução matemática para ressonância do circuito emissor.

Através da equação 7, calculamos a impedância da bobina emissora:

$$L = 1,256 \cdot \frac{2,25 \cdot 24}{0,051} \cdot 10^{-8} = 97,9206 \mu H$$

Em seguida com o valor da impedância da bobina emissora calculamos a capacitância para uma frequência de ressonância de 60Hz, a equação 6 nos fornece o seguinte valor:

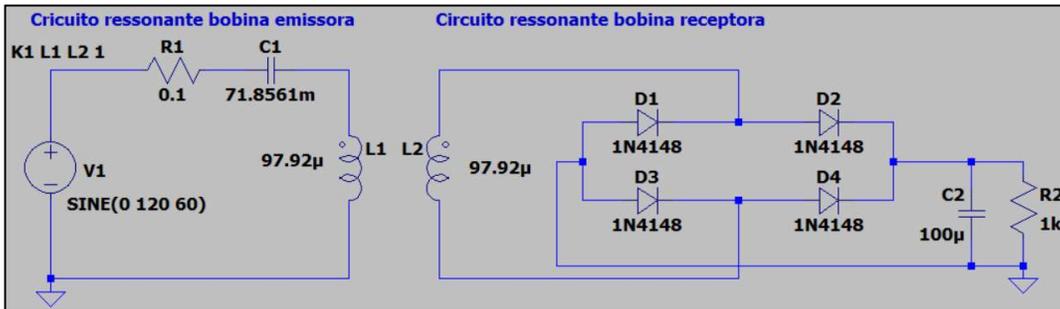
$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi^2 \cdot 60^2 \cdot 97,9206 \cdot 10^{-6}} = 71,8561 \text{ mF}$$

A seguir deve-se proceder à simulação do circuito no LTSpice e verificar os padrões das formas de ondas correspondem a frequência de ressonância e se o valor de tensão medido no receptor teve uma boa eficiência.

4.2.1. Construção do circuito completo no LTspice.

Os valores obtidos no primário foram replicados para o secundário, ainda no secundário foi inserido um retificador de onda completa para transformar a tensão alternada em tensão contínua, figura 10.

Figura 10 – Diagrama de circuito ressonante transmissor e receptor.



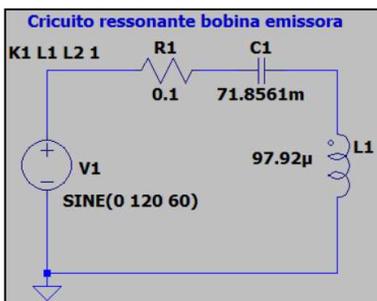
Fonte: Elaborado pelos Autores

Para a simulação no LTspice o coeficiente magnético foi ajustado para 1, com este valor temos um acoplamento perfeito, onde todo o fluxo magnético do primário vai para o secundário.

4.3.1 – Análise do circuito ressonante emissor.

O circuito emissor implementado é mostrado na figura 11 já considerando os valores calculados nas seções anteriores.

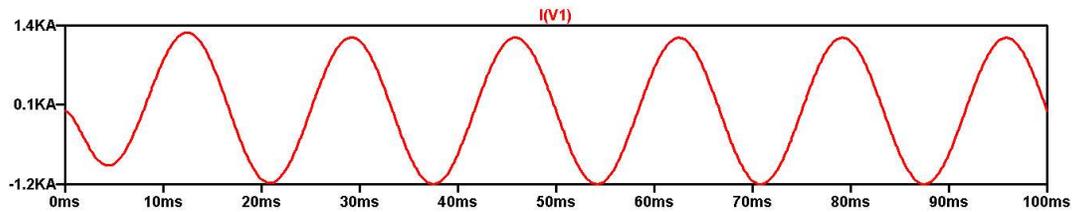
Figura 11 – Diagrama de circuito ressonante transmissor – bobina L1.



Fonte: Elaborado pelos Autores

O valor obtido da corrente no circuito foi de 1200A, portanto o circuito a 60Hz entrou em ressonância, figura 12.

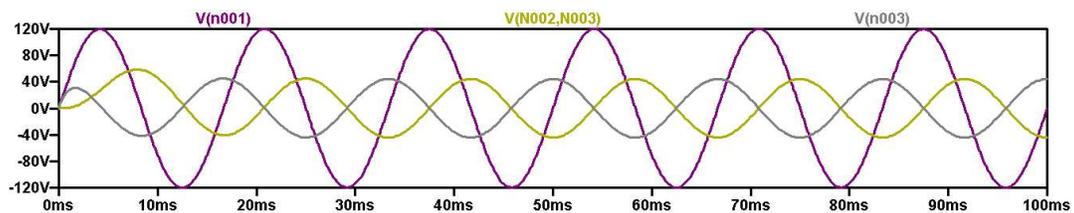
Figura 12 - Forma de onda da corrente na fonte V1.



Fonte: Elaborado pelos Autores

Temos a valores gerados pelo capacitor C1 sendo consumido pela bobina L1, resultando no circuito somente o valor gerado pelo resistor R1, figura 13.

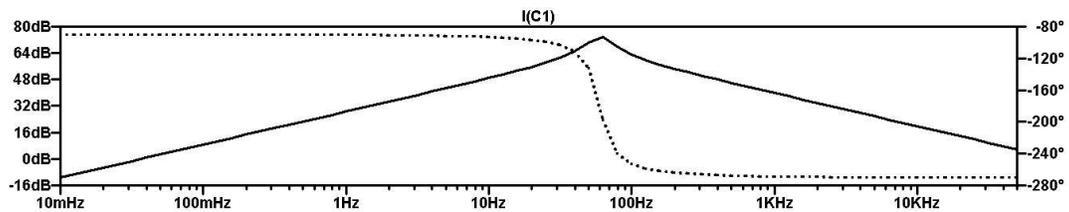
Figura 13 – Tensões: Bobina L1 (verde), Capacitor C1(azul), Resistor R1(Vermelho)



Fonte: Elaborado pelos Autores

O circuito também se comporta como um filtro elétrico, somente uma faixa de frequência é selecionado, figura 14.

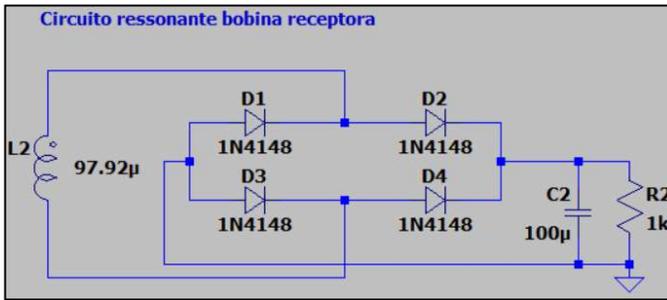
Figura 14 - Forma de onda na bobina no capacitor



Fonte: Elaborado pelos Autores

4.4.1 Análise do circuito ressonante receptor com retificador de onda completa

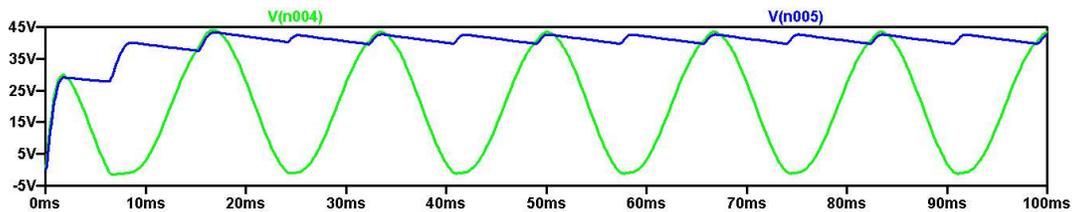
Figura 15 – Diagrama de circuito receptor com retificador com capacitor



Fonte: Elaborado pelos Autores

Pode-se perceber a tensão após o capacitor aproximadamente linear, gerando um ripple, figura 16.

Figura 16 – Formas de onda do retificador de onda completa com capacitor série



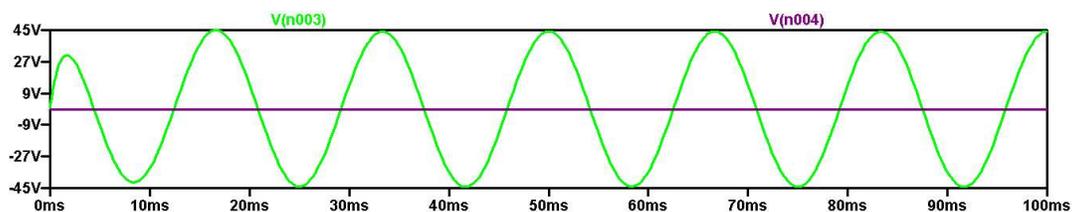
Fonte: Elaborado pelos Autores

4.5.1 Análise de tensão entre as bobinas L1 (verde) e bobina L2 (roxo) em relação a variação no acoplamento magnético (k).

Analisando as figuras das 17 a 21, percebemos uma variação considerável de tensão entre as bobinas L1 e L2 caso o acoplamento magnético não seja eficiente.

Com o valor de $k = 0$ foi obtido o valor de 0V na bobina L2, figura 17.

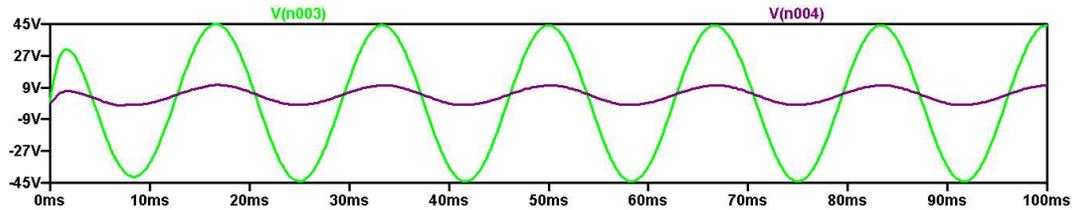
Figura 17 – Gráfico tensão bobina L1 x tensão na bobina L2 com acoplamento magnético $k=0$



Fonte: Elaborado pelos Autores

Com o valor de $k = 0.25$ foi obtido o valor de 10,29V na bobina L2, figura 18.

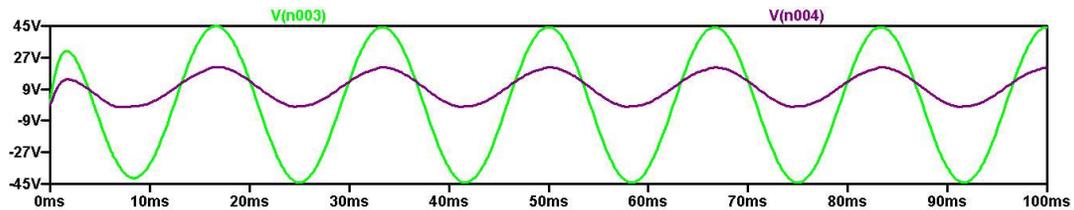
Figura 18 – Gráfico tensão bobina L1 x tensão na bobina L2 com acoplamento magnético $k=0.25$



Fonte: Elaborado pelos Autores

Com o valor de $k = 0,5$ foi obtido o valor de 21,32V na bobina L2, figura 19.

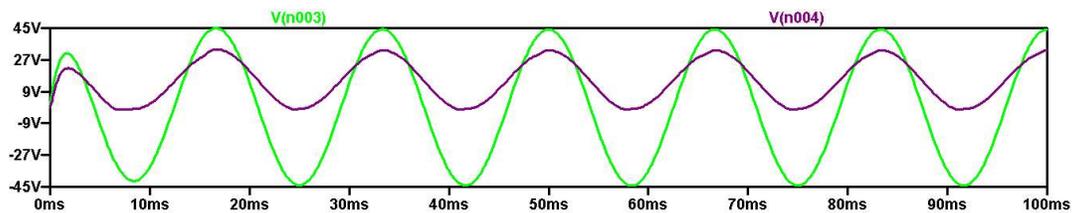
Figura 19 – Gráfico tensão bobina L1 x tensão na bobina L2 com acoplamento magnético $k=0,5$



Fonte: Elaborado pelos Autores

Com o valor de $k = 0,75$ foi obtido o valor de 32,35V na bobina L2, figura 20.

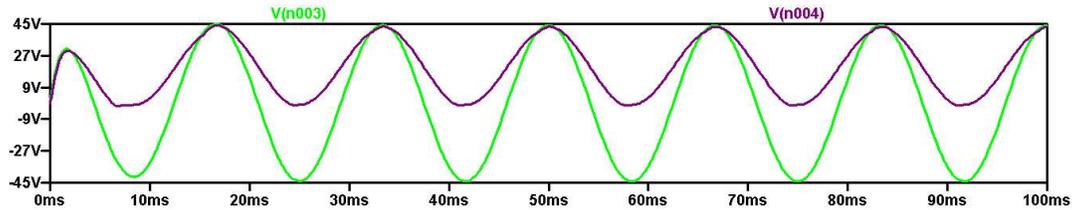
Figura 20 – Gráfico tensão bobina L1 x tensão na bobina L2 com acoplamento magnético $k=0,75$



Fonte: Elaborado pelos Autores

Com o valor de $k = 1$ foi obtido o valor de 41V na bobina L2, figura 21.

Figura 21 – Gráfico tensão bobina L1 x tensão na bobina L2 com acoplamento magnético k=1

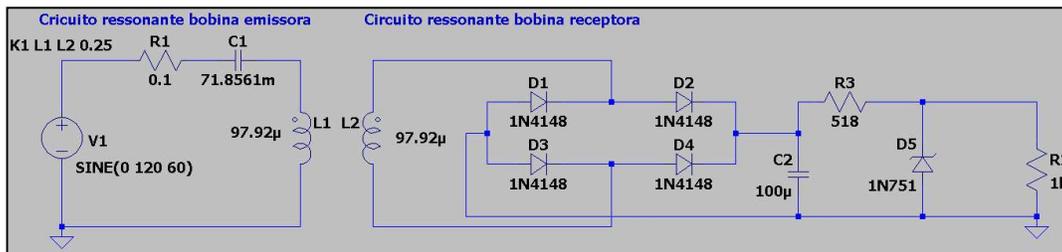


Fonte: Elaborado pelos Autores

4.6.1 Análise do circuito ressonante receptor com retificador de onda completa e regulador de tensão.

Para o regulador Zener foi inserido no circuito para converter a tensão AC suave de 44V em uma tensão DC de 5V contínua, figura 21.

Figura 22 – Diagrama de circuito ressonante transmissor e receptor com retificador de onda completa mais regulador de tensão



Fonte: Elaborado pelos Autores

Para o regulador Zener o diodo escolhido foi o 1N751A. Este diodo possui uma tensão de 5.1V, com corrente máxima de 70 mA, a corrente Zener mínima para este regulador foi de 10% do seu valor máximo.

A resistências mínima para R3 para uma corrente máxima de 70mA no diodo 1N751 foi:

$$R'_S = 518 \Omega$$

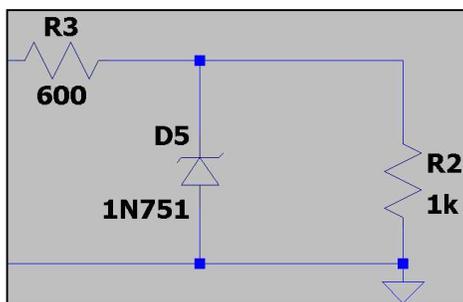
Com este valor de resistência R'_S ocorre máxima capacidade de condução de corrente no diodo, podendo sobreaquecer o diodo.

A resistência máxima para R3 para uma corrente mínima de 7mA no diodo 1N751 foi:

$$R_S'' = 3242 \Omega$$

Com este valor de resistência R_S'' ocorre mínima capacidade de condução de corrente no diodo, prejudicando seu funcionamento. O valor escolhido foi de 600Ω, figura 22.

Figura 23 – Diagrama de circuito ressonante transmissor e receptor com retificador de onda completa mais regulador de tensão



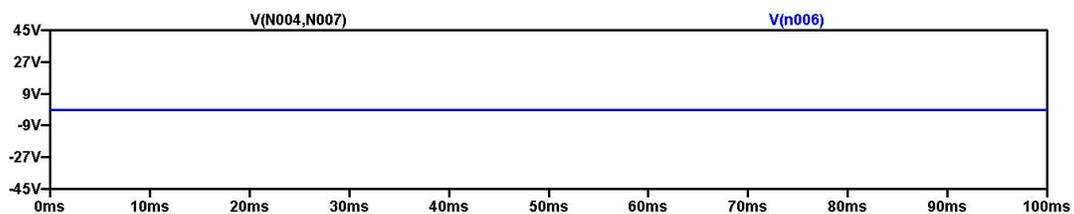
Fonte: Elaborado pelos Autores

4.7.1 Análise de tensão entre as bobinas L2 (preto) e resistor R2 (azul) em relação a variação no acoplamento magnético (k).

Analisando as figuras 23 a 27, percebemos uma constante e estável tensão fornecida ao resistor R2 pelo regulador Zenner com a variação no acoplamento magnético.

Com o valor de $k = 0$ foi obtido o valor de 0V no Resistor R2, figura 23.

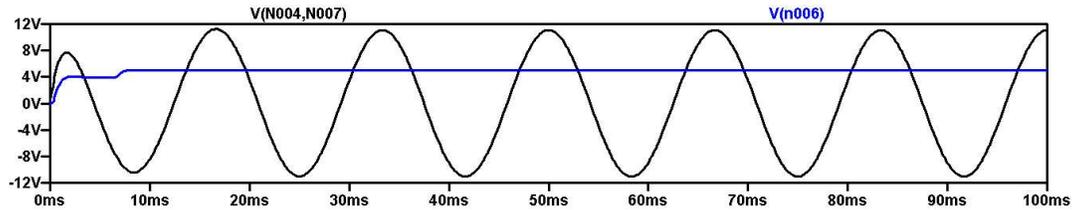
Figura 24 – Gráfico tensão bobina L2 (preto) x e Resistor R2(azul) com acoplamento magnético $k=0$



Fonte: Elaborado pelos Autores

Com o valor de $k = 0.25$ foi obtido o valor de 5.03V no Resistor R2, figura 24.

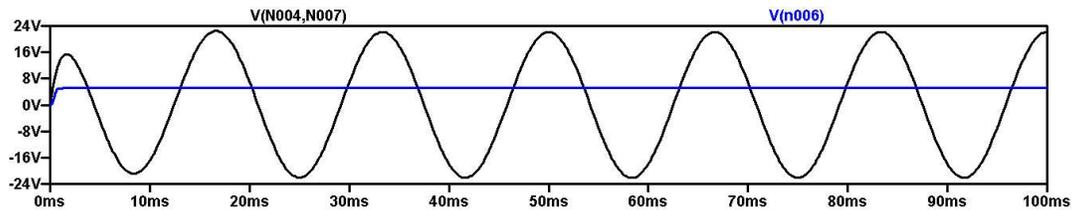
Figura 25 – Gráfico tensão bobina L2 (preto) x e Resistor R2(azul) com acoplamento magnético $k=0.25$



Fonte: Elaborado pelos Autores

Com o valor de $k = 0.5$ foi obtido o valor de 5.11V no Resistor R2 figura 25.

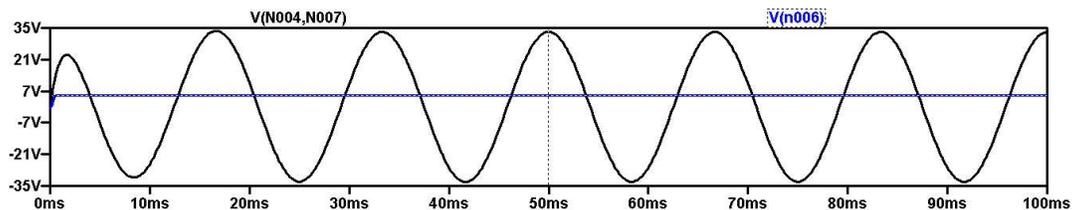
Figura 26 – Gráfico tensão bobina L2 (preto) x e Resistor R2(azul) com acoplamento magnético $k=0.5$



Fonte: Elaborado pelos Autores

Com o valor de $k = 0.75$ foi obtido o valor de 5.14V no Resistor R2, figura 26.

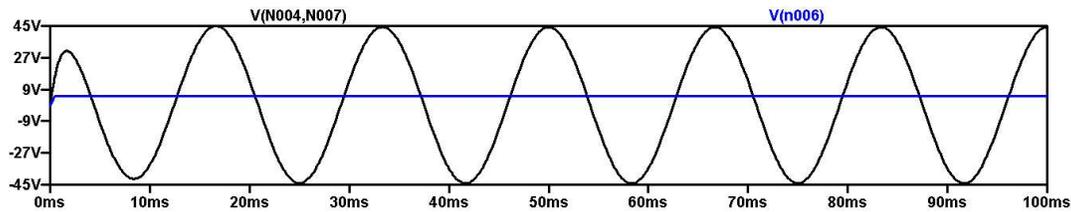
Figura 27 – Gráfico tensão bobina L2 (preto) x e Resistor R2(azul) com acoplamento magnético $k=0.75$



Fonte: Elaborado pelos Autores

Com o valor de $k = 1$ foi obtido o valor de 5.16V no Resistor R2, figura 27.

Figura 28 – Gráfico tensão bobina L2 (preto) x e Resistor R2(azul) com acoplamento magnético $k=1$



Fonte: Elaborado pelos Autores

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma introdução elementar à teoria eletromagnética necessária à transmissão de energia elétrica sem fio e o equacionamento básico para sua implementação, juntamente com um circuito ressonante, destinado a aumentar a eficiência no processo de transmissão de energia.

Ainda que a construção de circuitos elétricos que transfiram energia elétrica por meio de acoplamento eletromagnético não seja fato recente, muitas de suas aplicações práticas o são. Isso se deve ao fato dos necessários desenvolvimentos na miniaturização de circuitos elétricos e eletrônicos, bem como na redução dos custos envolvidos em sua produção.

A transmissão de energia sem fio mostra-se vantajosa em relação à forma tradicional quando se considera a não necessidade de ligação física através de cabos entre o emissor e o receptor. Isso é muito vantajoso quando se trata de dispositivos portáteis, ou daqueles que estejam instalados em locais onde sua retirada seja onerosa, ou perigosa, como é o caso de dispositivos eletrônicos utilizados em próteses e implantes dentro do corpo humano.

Ainda foi possível visualizar através das simulações desenvolvidas que o acoplamento magnético entre o emissor e o receptor é essencial para que a transmissão de energia se dê de forma eficiente. Ora, como este acoplamento depende do meio físico disponível para a transmissão, da potência máxima disponível para transmissão, do arranjo geométrico existente entre os elementos e da frequência usada na transmissão, percebe-se também que seu uso deve estar restrito dentro uma certa gama de aplicações, onde estes fatores possam ser ajustados e mantidos fixos com precisão.

Com relação aos quesitos segurança e sustentabilidade vê-se as vantagens da tecnologia apresentada quando se observa sua menor possibilidade de acidentes com pessoas e animais e menor uso de material de alto custo (cobre).

Ressalta-se que para frequências muito altas existe o risco de interferência eletromagnética com outros equipamentos, ou com obstáculos. Face a isso, rigorosa legislação e normatização deve estar aplicada a implementação destes sistemas.

Finalmente, destaca-se que a transmissão de energia sem fio é área de grande possibilidade de pesquisa e desenvolvimento, além de grande potencial econômico, tendo em vista a crescente disseminação de *gadgets* (tecnologias portáteis) e *wearables* (tecnologias vestíveis) cada vez mais potentes e presentes em nossa vida a todo instante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHIRE, D. A. (12 de Maio de 2017). **Wireless power transfer system for biomedical application: A review. Trends in Electronics and Informatics (ICEI), 2017 International Conference on** (pp. 135-140). Tirunelveli, India: IEEE.

CHANDRASEKAR, T. S.; K. G. RAO, (Maio de 2016). **Categories, Standards and Recent Trends in Wireless Power Transfer: A Survey. Indian Journal of Science and Technology**, 9, 20.

COVIC, G.A.; BOYS, J.T. **Inductive power transfer. Proc. IEEE 2013, 101**, 1276–1289.

DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 1.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 550p.

DE CASTRO, Wendel Riguete et al. **TECNOLOGIA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO (WIRELESS POWER TRANSFER)**. *Revista Mythos*, v. 15, n. 1, p. 105-117, 2021.

D. M. BEAMS, V. NAGOORKAR. **Design and Simulation of Networks for Midrange Wireless Power Transfer**. Dept. of Electr. Eng., Univ. of Texas at Tyler. Tyler, TX, USA, Ago, 2013 .

FITZGERALD E., C. K. (2006). **Máquinas elétricas com introdução à eletrônica de potência**. Bookman.

FERNANDES, T. R. (2017). **Indutância Mútua**. Acesso em 14 de Outubro de 2018, disponível em http://www.dt.fee.unicamp.br/~akebo/et016/Transformadores_Monofasicos-2.pdf

HAYT, William H. Jr. Eletromagnetismo. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1983.

HO, J. S., S. KIM e A. S. Y. POON. **Midfield Wireless Powering for Implantable Systems**. Em: 2012.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física. 10. ed.** Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2016 vol 3.

JACOBS, Paul E. et al. **Wireless power transfer for chargeable devices**. U.S. Patent Application n. 12/604,223, 9 set. 2010.

JANG, Y.J.; JEONG, S.; LEE, M.S. **Initial energy logistics cost analysis for stationary, quasi-dynamic, and dynamic wireless charging public transportation systems**. *Energies* 2016, 9, 783.

J. GARNICA, R. A. CHINGA ; J. LIN. **Wireless Power Transmission: From Far Field to Near Field**. Proceeding of the IEEE. Jun, 2013.

KOSOW, Irving L. **Máquinas elétricas e transformadores**. 15.ed. São Paulo: Globo, 2005. Xxi, 667p.

LI, Y.; MAI, R.; LIN, T.; SUN, H.; HE, Z. **A novel wpt system based on dual transmitters and dual receivers for high power applications: Analysis, design and implementation**. *Energies* 2017, 10, 174.

MIZUNO T.; UEDA, T.; YACHI S.; OHTOMO, S. e GOTO, Y. **Efficiency Dependence on Wire Type for Wireless Power Transfer of Magnetic Resonant Coupling**. International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). pp1-4. Out 21-21, 2012.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos Elétricos, 8a. Edição**. LTC– Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 2008.

QIANG Wang; HONG Li. **Research on the wireless power transmission system based on coupled magnetic resonances.** IEEE, 2011

SAZONOV, EDWARD; NEUMAN, MICHAEL R., **Wearable Sensors: Fundamentals, Implementation and Applications.** pp. 253–255. ISBN 0124186661. Elsevier. 2014.

SEN, P. C. (2014). **Principles Of Electric Machines And Power Electronics (3^a ed.).** Wiley.

SHINOHARA, Naoki. **Wireless Power Transfer via Radiowaves.** John Wiley & Sons, pp. 9-13. ISBN 1118862961. Ago, 2014.

SILVA, V. H. (23 de Julho de 2018). **Samsung poderá ter carregador por indução que suporta dois aparelhos.** Acesso em 13 de junho de 2020. Disponível em Tecnoblog: <https://tecnoblog.net/252448/carregador-samsung-wireless-charger-duo/>

TESLA, Nikola. **Minhas Invenções – A autobiografia de Nikola Tesla.** Editora UNESP, 2012.

ZHU, B.; LI, J.; HU, W.; GAO, X. **Review of Magnetic Coupling Resonance Wireless Energy Transmission.** *International Journal of u- and e- Service, Science and Technology.* V. 8, n. 3, p.257-272, 2015.

ZHUO Yan, YANG Li, CHAO Zhang, QINGXIN Yang. **Influence Factors Analysis and Improvement Method on Efficiency of Wireless Power Transfer Via Coupled Magnetic Resonance”, IEEE Transactions on Magnetics.** vol. 50. no. 4. Abr, 2014.

ZUMPANO, Antônio; ERCOLE, Grey; BUENO, Hamilton. **Ressonância: Para além dos cursos de física.** Set. 2004.