UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA PROJETO DE GRADUAÇÃO



## DEIVISON CORONA COLOMBO

# ESTUDO E SIMULAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIOS PARA CARREGAMENTO DE BATERIAS PORTÁTEIS

VITÓRIA – ES JUNHO/2018

### DEIVISON CORONA COLOMBO

## ESTUDO E SIMULAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIOS PARA CARREGAMENTO DE BATERIAS PORTÁTEIS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Deivison Corona Colombo, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para aprovação na disciplina "ELE08553 – Projeto de Graduação 2".

Profa. Dra. Tiara R. S. de Freitas Orientador

Prof. Dr. Domingos S. L. Simonetti Coorientador

Prof. Dr. Walbermark Santos Examinador

Profa. Msc. Elizandra Roque Coelho Examinador

VITÓRIA – ES JUNHO/2018

### **RESUMO**

Este trabalho realiza um breve estudo sobre a tecnologia de transferência de energia sem fios por meio de acoplamento indutivo ressonante. Esta técnica permite transmitir energia de curta a média distância, sem fios, através de campos magnéticos. Este método de transmissão vem impulsionando novos estudos e desenvolvimentos em diversas áreas, com o foco em veículos elétricos e dispositivos biomédicos. Neste estudo, é feita uma comparação, utilizando um sistema com dois ressonadores, entre as configurações com dois capacitores – topologia série-série (S-S) – e quatro capacitores de compensação para uma aplicação de recarga de bateria portátil. Para a configuração com dois capacitores são analisados dois casos, sendo um sugerido neste trabalho. A análise é efetuada utilizando a plataforma MATLAB/SIMULINK<sup>®</sup> e pode-se comparar as topologias nos quesitos desempenho, simplicidade e flexibilidade de operação. Por fim, aplicou-se a técnica para a simulação do carregamento de uma bateria.

**Palavras-Chave:** Transmissão de energia sem fio; acoplamento indutivo ressonante; recarga de bateria.

### ABSTRACT

This work presents a brief study about the wireless power transfer technology by using resonant inductive coupling method. This method allows short-distance to medium-distance power transmission, wirelessly, through magnetic fields. This method of transmission has been driving new studies and developments in several areas, focusing on electric vehicles and biomedical devices. In this study, a comparison is made using a system with a pair of resonators, between two capacitors configuration - series-series topology (S-S) - and four compensation capacitors for a portable battery recharge application. On this study, two capacitors configuration were analyzed in two cases; one of them was suggested by this work. The analysis is performed by using a MATLAB/SIMULINK<sup>®</sup> platform and the topologies can be compared in performance, simplicity and flexibility of operation. Finally, a technique for simulating a battery charging was applied.

Keywords: Wireless Power Transmission; Resonant Inductive Coupling; Battery Recharge.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Experiência de WPT: uma lâmpada de 60 W de potência é acesa a uma distância
de 2 metros utlizando o método de acoplamento indutivo ressonante10
Figura 2 - Uso da técnica WPT para recarga de celulares10
Figura 3 - Acoplamento Indutivo
Figura 4 - Acoplamento Indutivo Ressonante
Figura 5 - Acoplamento Capacitivo14
Figura 6 - Circuito RLC Série
Figura 7 - Fator de acoplamento medido e calculado variando a distância e o
desalinhamento entre duas bobinas planares com diâmetro de 30 mm17
Figura 8 - Duas bobinas planares espirais circulares acopladas, com raio médio $r_a$ e $r_b$
separadas por uma distância <i>z<sub>s</sub></i> 18
Figura 9 - (a) Circuito equivalente. (b) Variação da eficiência energética e potência de sáida
e relação a razão R <sub>L</sub> /R <sub>S</sub> 21
Figura 10 - Diagrama de uma experiência de energia sem fio de Tesla21
Figura 11 - (a) Circuito equivalente do sistema WPT acoplado por ressonância. (b) Circuito
tipo T equivalente22
Figura 12 - Topologias: (a) SS. (b) SP. (c) PS. (d) PP
Figura 13 - Diferentes topologias do circuito equivalente ressonante de duas bobinas. (a)
Quatro capacitores; (b) dois capacitores paralelo-paralelo; (c) dois capacitores série-
paralelo
Figura 14 - (a) WPT com quatro bobinas, um conjunto de bobinas fonte/envio e um
conjunto de bobinas de recepção/carga. (b) Circuito equivalente
Figura 15 - Divisão de frequência para um sistema de duas bobinas com compensação
série-série ( $f_0 = 5 \text{ MHz}$ )
Figura 16 - Modelo do sistema WPT de duas bobinas26
Figura 17 - Modelo equivalente de um sistema WPT com quatro capacitores de
compensação. A carga $R_L$ é considerada puramente resistiva27
Figura 18 - Circuito equivalente utilizado para simulação
Figura 19 - Modelo de bobina planar circular
Figura 20 - Resposta da tensão de saída (a) e potência média de saída (b) para os casos de
capacitores a 0.15% de ESR e para o caso de capacitores a ESR reais
Figura 21 - Circuito montado no Simulink para a configuração com quatro capacitores30

Figura 22 - Quatro capacitores: Tensão (a) e potência (b) de saída em função da distância
entre as bobinas
Figura 23 - Quatro capacitores: Tensão (a) e potência (b) de saída em função da frequência.31
Figura 24 - Circuito montado no Simulink para a configuração com dois capacitores32
Figura 25 - Dois capacitores: Tensão (a) e potência (b) de saída para diferentes frequências
de ressonância em função da distância entre as bobinas
Figura 26 - Dois capacitores: Tensão (a) e potência (b) de saída em função da frequência35
Figura 27 - Dois capacitores: Tensão (a) e potência (b) de saída em função da frequência36
Figura 28 - Caso 2: Tensão (a) e potência (b) de saída em função da distância entre as
bobinas. Capacitores ajustados para distância de 1 mm
Figura 29 – Caso 2: Tensão (a) e potência (b) de saída em função da frequência.
Capacitores ajustados para distância de 1 mm
Figura 30 - Circuito completo para carregamento de bateria
Figura 31 - Carregamento de uma bateria de 5 V de tensão nominal40

## LISTA DE TABELAS

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CMT	Coupled Mode Theory
ESR	Equivalent Serie Resistance
MIT	Massachusetts Institute of Technology
RLT	Reflected Load Theory
WPT	Wireless Power Transmission

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
	1.1 Escopo do Trabalho	11
2	A TECNLOGIA WPT	12
	2.1 Métodos de Transferência de Energia Sem Fio	12
	2.1.1 Acoplamento Indutivo	12
	2.1.2 Acoplamento Indutivo Ressonante	13
	2.1.3 Acoplamento Capacitivo	14
	2.1.4 Acoplamento Magneto-dinâmico	14
	2.2 Princípios Básicos: Acoplamento Indutivo Ressonante	15
	2.2.1 Ressonância	15
	2.2.2 Fator de Acoplamento e Indutância Mútua	16
	2.2.3 Fator de Qualidade Q	19
	2.2.4 Teoria de Modo Acoplado (CMT) x Teoria de Carga Refletida (RLT)	19
	2.2.5 Conceitos Fundamentais de Transmissão de Energia	20
	2.3 Topologias do Acoplamento Indutivo Ressonante	21
	2.3.1 Circuito com duas bobinas	21
	2.3.2 Circuito com quatro bobinas	23
	2.4 Divisão de Frequência (Frequency Splitting)	24
3	SIMULAÇÃO	27
	3.1 Modelo de Referência	27
	3.2 Simulação realizada com carga resistiva	29
	3.2.1 Quatro Capacitores de Compensação	30
	3.2.2 Dois Capacitores de Compensação	32
	3.2.2.1 Caso 1: Anulação das reatâncias dos ressonadores	33
	3.2.2.2 Caso 2: Otimização dos capacitores	37
	3.3 Simulação Aplicada: Carregamento de bateria	39
4	CONCLUSÃO	41
	4.1 Sugestão de Trabalhos Futuros	41
R	EFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

## 1 INTRODUÇÃO

O contínuo avanço tecnológico tem proporcionado um crescimento de dispositivos portáteis os quais vêm sendo muitos utilizados no dia a dia para diversas aplicações garantindo uma mobilidade aos usuários. Um bom exemplo são as chamadas telefônicas que eram exclusivamente feitas por telefone fixo e atualmente para esse serviço o telefone móvel vem sendo o mais usual (1).

Porém, existem fatores que limitam a mobilidade desses dispositivos portáteis, como por exemplo, a sua autonomia; o uso de cabos para alimentação, restringidos por seu comprimento; a necessidade de recarga da bateria; e procura por interruptores, sendo muitas vezes utilizado um por dispositivo.

A transmissão de energia elétrica sem o uso de fios já é uma ideia que fascina as pessoas há algum tempo. O inventor Nikola Tesla realizou experimentos sendo o mais conhecido o *Wardenclyffe Tower*, também chamada de Torre de Tesla. O objetivo do laboratório *Wardenclyffe*, construído no início do século 20, foi a fundação de uma fábrica de telecomunicações que demonstrava a transmissão de energia sem a utilização de cabos conectores. Devido a problemas financeiros e uma tecnologia limitada na época, esse projeto nunca foi terminado. Desde então, o estudo no ramo de transmissão de energia sem fio foi deixado de lado (2) (3).

Na última década, houve um aumento significativo no uso de dispositivos eletrônicos autônomos cujas baterias precisam ser constantemente recarregadas. Como consequência desse aumento e de alguns fatores que limitam a mobilidade já mencionados anteriormente, as pesquisas direcionadas à tecnologia de transmissão de energia sem fio (*Wireless Power Transmission* - WPT) ganharam incentivo. Os estudos desenvolvidos em 2007 e 2009, divulgados pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) cujos resultados obtidos foram considerados com eficiência satisfatória na transmissão de potência sem fio de médio alcance, contribuíram com uma sustentação teórica. Basicamente, nesses estudos foram realizados experimentos utilizando o modo de acoplamento ressonante, que será detalhado mais à frente, colocando duas bobinas de raio de 30 cm cada, separadas por uma distância de 2 metros, para oscilar numa mesma frequência especificada com o objetivo de se obter a eficiência para transmitir 60 W de potência, como pode ser visto na Figura 1. A eficiência obtida foi cerca de 40% para uma frequência de 10 MHz (2) (4) (5).

Figura 1 - Experiência de WPT: uma lâmpada de 60 W de potência é acesa a uma distância de 2 metros utilizando o método de acoplamento indutivo ressonante.

Fonte: KURS, 2007. (4)

O uso desta tecnologia já vem sendo utilizada em carregadores sem fio pela empresa WiTricity (6): uma base é conectada à rede elétrica e a energia é transmitida pela técnica WPT para recarga dos celulares, podendo ser utilizada a mesma base por múltiplos dispositivos eletrônicos. Dentre algumas vantagens da transmissão de energia sem fio pode-se citar: a redução de demanda por cabos de força, a maior durabilidade das baterias (7), diminuindo assim o número de baterias descartadas; e a compatibilidade com diferentes dispositivos, não precisando se preocupar com diferentes cabos e plugues, como pode ser visto na Figura 2.



Figura 2 - Uso da técnica WPT para recarga de celulares.

Fonte: VCPN, Cutting the Power Chord, 2016.

Outras aplicações já estão sendo estudadas e desenvolvidas como o uso da técnica WPT em veículos elétricos (8), (9) e implantes biomédicos (10), (11). Nos últimos anos o número de veículos elétricos aumentou rapidamente e um conjunto de pesquisas vem surgindo, buscando a possibilidade de recarga automática do veículo ao estacionar, melhorando sua autonomia, reduzindo o tempo gasto na recarga ou até mesmo permitindo que o veículo elétrico seja carregado durante seu movimento. Em dispositivos médicos implantados, como os dispositivos de assistência ventricular esquerda e marca-passos, usando a tecnologia WPT, esses dispositivos podem ser alimentados eficientemente através da pele e em distâncias maiores do que a espessura desta, eliminando a necessidade de fios que penetram o corpo humano e evitando intervenção cirúrgica para troca de baterias (12).

Portanto, incentivado por essa inovação que vem ganhando mercado, neste trabalho é desenvolvido como objeto de pesquisa um estudo bibliográfico desta tecnologia WPT e é estudado o comportamento do modelo em ferramenta computacional que permite simular a tecnologia e sua aplicação em carregamento de baterias portáteis.

### 1.1 Escopo do Trabalho

Este trabalho será desenvolvido, em quatro capítulos, conforme descrito a seguir.

No capítulo 1, é realizada a introdução com a apresentação da técnica WPT e suas aplicações.

No capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica a respeito da tecnologia estudada.

No capítulo 3, a partir dos modelos de circuitos são apresentados os resultados da simulação.

Por fim, as conclusões do trabalho e as sugestões de trabalhos futuros são apresentados no capítulo 4.

### **2** A TECNLOGIA WPT

O estudo da transmissão de energia sem fio realizado por Nikola Tesla, no século 20, ressurgiu recentemente devido aos avanços tecnológicos e ao surgimento de dispositivos eletrônicos autônomos. A seguir, será feito uma revisão bibliográfica sobre esta tecnologia.

A técnica de transferência de energia sem fio geralmente se divide em duas categorias: não-radiativa e radiativa. Em não-radiativa, também conhecida como campo próximo (*near-field*), a energia é transferida a curta ou média distância por campos magnéticos (acoplamento indutivo) ou por campos elétricos (acoplamento capacitivo) (13). Na transferência radiativa, conhecida também como campo distante (*far-field*), a energia é transferida por radiação eletromagnética, por exemplo, micro-ondas ou raio laser. Esta técnica pode transmitir energia a longa distância (alcance de quilômetros), mas deve ser direcionada ao receptor, não tendo obstáculos entre este e o transmissor (13).

Em (13) e (14) é descrito uma diferenciação entre *near-field* e *far-field*: a região que se estende além de dois comprimentos de onda longe da fonte é denominada de *far-field* e a relação entre os campos magnético e elétrico pode ser representado por equações; a região que corresponde de *1* até *2* comprimentos de onda é chamada de zona de transição, e é a região que contêm características combinadas do *near-field* e do *far-field*; por último, a região localizada a menos de *1* comprimento de onda é chamada de *near-field*: os campos magnético e elétrico oscilam separados e a relação entre eles torna-se muito complexa, necessitando de medições para determinar a densidade de energia.

### 2.1 Métodos de Transferência de Energia Sem Fio

O objeto de estudo deste trabalho é o método de acoplamento indutivo ressonante, uma técnica não-radiativa. Dentro desta categoria existem outras maneiras de transferência de energia sem fio. A seguir é feita uma breve descrição simplificada de alguns métodos.

### 2.1.1 Acoplamento Indutivo

O acoplamento indutivo é um método amplamente utilizado e aplicado nos transformadores convencionais onde a transferência de energia ocorre entre as bobinas pelo campo magnético e sua eficiência de transmissão é alta quando as bobinas primária e secundária estão próximas umas das outras e bem alinhadas garantindo um forte acoplamento magnético; este acoplamento é enfraquecido rapidamente com a distância e o desalinhamento axial e angular entre as bobinas. Na Figura 3 é ilustrado o seu funcionamento: a bobina do

transmissor (L1) é percorrida por uma corrente alternada que, descrita pela Lei de Ampère, cria um campo magnético variável em seu entorno. Esse campo variável atravessa a bobina do receptor (L2) que, demostrado pela Lei de Faraday-Lenz, cria uma força eletromotriz na bobina e, consequentemente, uma corrente induzida no circuito de carga, um fenômeno chamado de indução eletromagnética (13). Em (15) e (16), um estudo dessa técnica é realizado para recarga de bateria em veículos elétricos.

Figura 3 - Acoplamento Indutivo.



Fonte: WIKIPEDIA, Wireless Power Transfer, 2014. (13)

### 2.1.2 Acoplamento Indutivo Ressonante

Pode-se dizer que o acoplamento indutivo ressonante é uma forma aprimorada do acoplamento indutivo convencional para transferência de energia. Um exemplo é mostrado na Figura 4, onde dois circuitos ressonantes, um transmissor e outro receptor, cada um constituído de uma bobina conectada a um capacitor, ou uma bobina auto ressonante, são ajustados à mesma frequência da fonte, permitindo a transferência de energia com alta eficiência para distâncias maiores em comparação ao acoplamento indutivo. Nas seções seguintes é discutido de forma mais detalhada o acoplamento indutivo ressonante.





Fonte: WIKIPEDIA, Wireless Power Transfer, 2015. (13)

### 2.1.3 Acoplamento Capacitivo

No acoplamento capacitivo a energia é transmitida por campos elétricos entre eletrodos, transmissor e receptor, formando um capacitor. Como ilustrado na Figura 5, uma tensão alternada é aplicada na placa transmissora e o campo elétrico oscilante, por indução eletrostática na placa receptora, faz que uma corrente alternada flua no circuito de carga. O acoplamento capacitivo é praticamente usado para aplicações de baixa potência; para aplicações de alta tensão o uso desta técnica poder ser perigoso devido à forte interação do campo elétrico ao seu entorno (13). Em (17) é desenvolvido um sistema de carregamento de bateria sem fio para utilização em *drones*.





Fonte: WIKIPEDIA, Wireless Power Transfer, 2015. (13)

### 2.1.4 Acoplamento Magneto-dinâmico

Com o foco voltado para veículos elétricos o acoplamento magneto-dinâmico consiste em uma simples interação de campo magnético entre dois imãs permanentes e giratórios que são separados por 10 cm a 15 cm de ar. A energia é transmitida entre duas armaduras rotativas (transmissor e receptor) com um imã permanente em cada. A armadura do transmissor é girada por um motor elétrico e seu campo magnético exerce um torque sobre a armadura do receptor, girando-o e produzindo energia para alimentar a carga. O campo magnético atua como um acoplamento mecânico: a eficiência de transmissão de energia é mais de 90% (13), (18).

### 2.2 Princípios Básicos: Acoplamento Indutivo Ressonante

Como mencionado anteriormente, o acoplamento indutivo ressonante é uma ideia baseada no princípio de que dois ressonadores sintonizados na mesma frequência de ressonância podem trocar energia com maior eficiência a uma longa distância de operação em comparação com abordagens de acoplamento indutivo (19). Diferente do acoplamento indutivo, o conceito teórico por trás do acoplamento indutivo ressonante é o fator de qualidade Q, ou seja, um acoplamento forte não significa um alto fator de acoplamento, , um alto fator de qualidade pode compensar a queda do fator de acoplamento (20). A distância, frequência e a carga são os parâmetros-chaves para o sistema WPT.

A seguir alguns conceitos fundamentais são apresentados para dar prosseguimento ao estudo do método acoplamento indutivo ressonante.

### 2.2.1 Ressonância

Este fenômeno é um dos principais pontos para a realização da transferência de energia sem fio pelo método de acoplamento indutivo ressonante.

Quando um corpo sofre uma perturbação periódica externa cuja frequência iguala-se à frequência natural de oscilação, ocorre o fenômeno denominado ressonância (21). Este é o princípio utilizado na comunicação como transmissões de rádio e TV; outro exemplo também é o da taça de vidro, um cantor emite ondas sonoras na mesma frequência natural da taça fazendo-a quebrar devido a energia recebida pela perturbação externa (ondas sonoras).

Na Figura 6 é mostrado um circuito RLC série no qual pode se obter um modelo básico de ressonância eletromagnética.

Figura 6 - Circuito RLC Série.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Considerando  $V_S$  e  $I_L$  os valores eficazes de tensão e corrente, respectivamente, e  $R_L$  a impedância de carga puramente resistiva, tem-se a equação de malha na expressão (2.1).

16

$$I_L = \frac{V_S}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + R_L}$$
(2.1)

E a potência que é entregue a carga:

$$P_o = R_L |I_L|^2 = \frac{R_L V_S^2}{(R + R_L)^2 + \left(\frac{\omega^2 L C - 1}{\omega C}\right)^2}$$
(2.2)

Analisando a expressão (2.2) pode-se observar que a máxima transferência de energia da fonte para a carga ocorre quando o segundo termo do denominador é nulo, ou seja,

$$\omega^2 L C - 1 = 0 \tag{2.3}$$

onde a velocidade angular é dada pela expressão (2.4).

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{2.4}$$

Assim,

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.5}$$

onde  $f_R$  é a frequência de ressonância, ou seja, a frequência em que a reatância capacitiva  $(X_C = 1/\omega C)$  anula-se com a reatância indutiva  $(X_L = \omega L)$  restando só as perdas resistivas.

### 2.2.2 Fator de Acoplamento e Indutância Mútua

O fator de acoplamento k mostra o grau de acoplamento entre as bobinas de transmissão e de recepção. Este fator pode variar entre 0 e 1; o valor 1 expressa o acoplamento perfeito, ou seja, todo o fluxo gerado pela bobina transmissora é recebido pela bobina receptora; o valor 0 expressa que as bobinas transmissora e receptora são independentes uma da outra. O fator de acoplamento depende da distância de separação e do alinhamento entre as bobinas (22). Na Figura 7, pode-se observar o comportamento do fator de acoplamento com a variação da distância de separação e o desalinhamento entre duas bobinas iguais com diâmetro de 30 mm.



Figura 7 - Fator de acoplamento medido e calculado variando a distância e o desalinhamento entre duas bobinas planares com diâmetro de 30 mm.

Fonte: WIRELESS POWER CONSORTIUM, Coupling Factor, 2014. (22)

O fator de acoplamento está relacionado com a indutância mútua (M) pela expressão (2.6),

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \tag{2.6}$$

De acordo com (23), o fator de acoplamento entre duas bobinas solenoides, sem nenhum desalinhamento entre elas, para aplicação de médio alcance é dado por

$$k_{12} = \frac{1}{\left[1 + 2^{\frac{2}{3}} \left(\frac{d}{\sqrt{r_1 r_2}}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}$$
(2.7)

Onde *d* é a distância de separação entre as bobinas transmissora e receptora e  $r_1$ ,  $r_2$  os seus respectivos raios. Se a distância *d* for muito maior comparado aos raios  $r_1 e r_2$  a expressão (2.7) torna-se

$$k_{12} \approx \frac{1}{2\left(\frac{d}{\sqrt{r_1 r_2}}\right)^3}, \quad se \ d \gg r_1, r_2$$
 (2.8)

Em (24) a indutância mútua (*M*) entre duas bobinas planares espirais circulares é calculada pelo método dos filamentos, dividindo cada indutor em (2S+1) e (2s+1) anéis, como mostra na Figura 8. A expressão (2.9) permite o cálculo de *M*.

# Figura 8 - Duas bobinas planares espirais circulares acopladas, com raio médio $r_a$ e $r_b$ separadas por uma distância $z_s$ .



Fonte: SILVA, 2012. (24)

$$M = \frac{N_a N_b}{(2S+1)(2s+1)} \sum_{h=-S}^{h=S} \sum_{l=-S}^{l=s} M(h,l)$$
(2.9)

onde  $N_a$ ,  $N_b$  é o número de espiras nos indutores a e b, respectivamente. E M(h,l), indutância mútua entre dois anéis filamentares, é dada pelas expressões a seguir.

$$M(h,l) = \frac{2\mu_0 \sqrt{r(h)r(l)}}{k(h,l)} \left[ \left( 1 - \frac{k^2(h,l)}{2} \right) K(k^2(h,l)) - E(k^2(h,l)) \right]; \quad (2.10)$$

$$r(h) = r_a + \frac{h_a}{2S+1}h, \quad h = -S \dots 0 \dots S, \quad h_a = r_2 - r_1, \quad r_a = \frac{r_2 + r_1}{2};$$

$$r(l) = r_b + \frac{h_b}{2s+1}l, \quad l = -s \dots 0 \dots s, \quad h_b = r_4 - r_3, \quad r_b = \frac{r_4 + r_3}{2};$$

$$k^2(h,l) = \frac{4r(h)r(l)}{(r(h) + r(l))^2 + z_s^2} \quad (2.11)$$

Na expressão (2.10)  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do ar; e  $K(k^2(h,l))$  e  $E(k^2(h,l))$  são integrais elípticas de primeira e segunda espécie, respectivamente. Na expressão (2.11)  $z_s$  é a distância de separação entre as bobinas e em toda a análise as bobinas são consideradas alinhadas.

### 2.2.3 Fator de Qualidade Q

O fator de qualidade Q ou Fator-Q em circuitos com frequência de ressonância  $\omega_o$  é definido como a razão entre a energia armazenada em campos elétricos e magnéticos e a energia dissipada por perdas ôhmicas e radioativas em cada ciclo (25).

$$Q = \omega_o \frac{W}{P} = 2\pi \frac{\text{energia armazenada}}{\text{energia dissipada por período}}$$
(2.12)

Um alto valor do fator de qualidade implica que o circuito pode armazenar uma grande quantidade de energia em comparação com a energia dissipada em um período. Em (25) para a frequência de ressonância  $\omega_o$ , o fator de qualidade pode ser expresso como

$$Q = \begin{cases} \frac{\omega_o L}{R}, & \text{circuito ressonante série} \\ \frac{R}{\omega_o L}, & \text{circuito ressonante paralelo} \end{cases}$$
(2.13)

Junto com o fator de acoplamento k, o fator de qualidade Q é muito importante para técnica WPT impactando na eficiência de transmissão de energia.

### 2.2.4 Teoria de Modo Acoplado (CMT) x Teoria de Carga Refletida (RLT)

A técnica WPT indutivo ressonante é demonstrada tanto pela Teoria de Modo Acoplado (*Coupled Mode Theory* - CMT) quanto pela Teoria de Carga Refletida (*Reflected Load Theory* - RLT). O CMT é um método utilizado pelos físicos que consideram a energia armazenada no sistema e trocada entre dois ou mais objetos ressonantes. O RLT é um método utilizado pelos engenheiros eletricistas que analisam bobinas indutivamente acopladas usando as Leis de Kirchhoff (26).

Em (26) é mostrado que tanto o CMT quanto o RLT apresentam o mesmo conjunto de equações em estado estacionário ao prever a eficiência média de transmissão e ambos métodos são validados para condições de acoplamento de curto e médio alcance. Já para análises transitórias o CMT é aplicável apenas para bobinas com baixo acoplamento e alto fator de qualidade. No entanto, a ordem das equações diferenciais é simplificada pela metade em comparação com a abordagem baseada em circuitos.

### 2.2.5 Conceitos Fundamentais de Transmissão de Energia

Antes de dar prosseguimento ao estudo da técnica WPT, é bom diferenciar dois conceitos sobre transmissão de energia: princípio de transferência máxima de energia e o princípio de máxima eficiência energética.

O princípio de transferência máxima de energia é uma prática comum utilizada em projetos de circuitos de radiofrequência. Este princípio requer a correspondência de impedância entre a fonte e a carga. Um circuito equivalente é mostrado na Figura 9 (a), se a impedância da fonte é  $R_s + jX_s$  e a impedância da carga é  $R_L + jX_L$ , a potência entregue a carga é máxima quando  $R_s = R_L$  e  $X_s = -X_L$ . Na Figura 9 (b) deve notar-se que transferência máxima de energia e máxima eficiência energética não são iguais. A medida que  $R_L$  aumenta, maior será a razão  $R_L/R_s$  e maior se torna a eficiência energética. Pode-se observar também que, utilizando a abordagem de transferência máxima de energia, a eficiência energética não passa de 50% como mostra na expressão (2.14) (27).

$$\eta_e = \frac{i^2 R_L}{i^2 R_S + i^2 R_L} = \frac{R_L}{R_S + R_L} = 0.5$$
(2.14)

Portanto, metade da energia fornecida é dissipada na resistência da fonte  $R_S$  se aplicado o princípio de transferência máxima de energia. Em (4) a eficiência energética do sistema é de apenas 15% enquanto a eficiência de transmissão entre as bobinas para uma distância de 2 metros é cerca de 40%. O uso do princípio máximo de transferência de energia deve ser usado em aplicações de médio alcance em que a eficiência energética do sistema não é de interesse primário (27).

O princípio da máxima eficiência energética, como o nome já diz, visa maximizar a eficiência energética no processo de transmissão de energia. A escolha de uma fonte de baixa impedância interna é muito importante para atingir a máxima eficiência energética. Se  $R_S$  é muito pequeno, a perda  $I^2R_S$  é muito pequena e a maior parte da energia vai para carga ( $I^2R_L$ ), resultando em alta eficiência energética. A máxima eficiência energética, aplicada em curto alcance, depende do coeficiente de acoplamento magnético entre as bobinas, que aumenta com o fator de qualidade e diminui com a distância de transmissão (27).



Figura 9 - (a) Circuito equivalente. (b) Variação da eficiência energética e potência de sáida e relação a razão R<sub>L</sub>/R<sub>S</sub>.

Fonte: HUI, 2014. (27)

### 2.3 Topologias do Acoplamento Indutivo Ressonante

O primeiro estudo de circuito ressonante foi realizado por Nikola Tesla, como mostrado na Figura 10, onde um capacitor é conectado à bobina primária e uma lâmpada de 40 W é conectada à bobina secundária. O acoplamento indutivo ressonante pode ser implementado por diferentes tipos de topologias, isto é, dependendo da aplicação, o projeto do circuito ressonante pode ser constituído por duas ou quatro bobinas.





Fonte: TWENTY FIRST CENTURY BOOKS, MIT Witricity - Not So Original After All. (28)

### 2.3.1 Circuito com duas bobinas

Na pesquisa atual do WPT, a estrutura básica em geral adotada é o sistema com dois ressonadores, composto por um indutor e capacitor cada. A Figura 11 (a) mostra o modelo do

circuito equivalente de um sistema WPT acoplado por ressonância. A Figura 11 (b) mostra o mesmo esquema representado por um circuito tipo T equivalente (19).



Figura 11 - (a) Circuito equivalente do sistema WPT acoplado por ressonância. (b) Circuito tipo T equivalente.

Fonte: BARMAN, 2015. (19)

São possíveis quatro topologias com dois capacitores de compensação: série-série (SS), série-paralelo (SP), paralelo-série (PS) e paralelo-paralelo (PP) coo mostrado na Figura 12.



Existe um limitador do sistema de ressonância de duas bobinas para aplicações de alcance médio devido a eficiência de transmissão ser proporcional ao quadrado do fator de

acoplamento magnético, o que implica a eficiência cair rapidamente com o aumento da distância (27).

$$\eta \propto \frac{k_{12}^2}{2} \tag{2.15}$$

Em (29) os efeitos causados pelo uso de um, dois ou quatro capacitores de compensação são analisados; um sistema equivalente de três configurações é mostrado na Figura 13, e em (30) é feito uma análise de eficiência com essas três disposições de capacitores tendo como melhor desempenho na transmissão a configuração com dois capacitores conectados a bobina primária e dois capacitores conectados a bobina secundária.

Figura 13 - Diferentes topologias do circuito equivalente ressonante de duas bobinas. (a) Quatro capacitores; (b) dois capacitores paralelo-paralelo; (c) dois capacitores série-paralelo.



Fonte: MOTTA, 2016. (29)

### 2.3.2 Circuito com quatro bobinas

O sistema de quatro bobinas é tipicamente projetado colocando duas bobinas intermediárias entre as bobinas de fonte e carga, como mostrado na Figura 14. O uso das duas bobinas intermediárias fornece dois fatores de acoplamento adicionais para a correspondência de impedância, considerando insignificante o acoplamento entre a as bobinas de fonte e carga, entre a bobina transmissora e a bobina de carga e entre a bobina de fonte e a bobina receptora. Dessa maneira, o sistema de quatro bobinas fornece três fatores de acoplamento k<sub>PS</sub>, k<sub>SR</sub> e k<sub>RD</sub> que podem ser ajustados para maximizar a transferência de energia se a seguinte condição for satisfeita (27):

$$\frac{k_{PS}k_{RD}}{k_{SR}} = 1 \tag{2.16}$$

Os dois fatores de acoplamento adicionais oferecem uma flexibilidade para aplicações de alcance médio, isto é, aumentando a distância entre os ressonadores, o acoplamento  $k_{SR}$  diminuirá, porém, os dois fatores  $k_{PS}$  e  $k_{RD}$  podem ser ajustados de maneira que satisfaça a expressão (2.16). Outro fator importante para aplicações de alcance médio é que a fonte e a carga estão separadas fisicamente dos ressonadores, isso contribui para um alto fator de qualidade Q. Uma desvantagem do sistema de quatro bobinas em comparação ao de duas bobinas é o espaço que é ocupado para implementação (19).

Figura 14 - (a) WPT com quatro bobinas, um conjunto de bobinas fonte/envio e um conjunto de bobinas de recepção/carga. (b) Circuito equivalente.



Fonte: HUI, 2014. (27)

### 2.4 Divisão de Frequência (Frequency Splitting)

No sistema WPT, a distância de separação entre as bobinas transmissora e receptora interfere na eficiência de transmissão de energia, ou seja, quanto maior a separação entre as bobinas, menor é a eficiência de transmissão e quanto menor a distância, maior é a eficiência. Porém, foi observado no sistema de acoplamento indutivo ressonante que ao se aproximar as bobinas a partir de uma distância específica a eficiência de transmissão não aumentava mais; ao contrário, diminuía indo contra o senso comum. Como já visto anteriormente, a eficiência de transferência de energia é máxima, no sistema WPT por acoplamento indutivo ressonante, quando os ressonadores oscilam na mesma frequência do sistema. Ao aumentar o fator de acoplamento k, isto é, diminuir a distância entre as bobinas, essa aproximação ocasiona o fenômeno de divisão de frequência fazendo com que a máxima transferência de energia não ocorra mais na frequência do sistema, deslocando a frequência de ressonância para dois

pontos, um abaixo e outro acima da frequência do sistema, como pode ser visto na Figura 15 (31)~(34).



Figura 15 - Divisão de frequência para um sistema de duas bobinas com compensação série-série ( $f_0 = 5 \text{ MHz}$ ).

Fonte: MOTTA, 2016. (29)

Em (32), para a configuração com quatro bobinas, através de cálculos e experiências verificou-se para distâncias próximas, a resistência interna da fonte e as indutâncias mútuas adicionais, das bobinas de fonte/envio e das bobinas de recepção/carga, são os fatores relacionados ao fenômeno de divisão de frequência. Em (34) são investigadas as variações de distância e frequência na potência de saída e na eficiência do WPT. Os resultados de simulação e experiência, negligenciando a resistência interna da fonte, mostram que há uma distância ideal para que ocorra a máxima transferência de energia na frequência de ressonância. Essa distância ideal é chamada de distância crítica e para valores abaixo desta distância ocorre a divisão de frequência ocasionando dois picos para a potência de saída. Já a eficiência do sistema tem seu único pico sempre na frequência de ressonância.

Em (33), para duas bobinas com compensação série-série, Figura 16, o fator de acoplamento crítico foi calculado e está representado na expressão (2.17).

$$k_{cr} = \sqrt{\frac{(R_s + R_2)(R_3 + R_L)}{\omega_0^2 L_2 L_3}}$$
(2.17)

Figura 16 - Modelo do sistema WPT de duas bobinas.



Fonte: HUANG, 2014. (33)

De (2.7) e (2.17), a distância na condição de transferência de potência máxima pode ser estimada como,

$$d_{cr} = \sqrt{\left(\frac{(1/k_{cr})^{2/3} - 1}{2^{2/3}}\right)r_1r_2}$$
(2.18)

Como a potência de saída é baixa na frequência de ressonância devido ao fenômeno de divisão de frequência, é necessário encontrar uma condição de acoplamento crítico. Usando (2.17) e (2.18), a relação entre frequência e distância no acoplamento crítico pode ser calculada a partir de (2.19).

$$f = \sqrt{\frac{(R_s + R_2)(R_3 + R_L)}{4\pi^2 L_2 L_3}} \left[ 1 + 2^{2/3} \left( \frac{d}{\sqrt{r_1 r_2}} \right)^2 \right]^{3/2}$$
(2.19)

Em (29) é citado que no sistema com dois capacitores não há compensação da reatância mútua, sendo esta a origem do fenômeno de divisão de frequência e propõe uma nova configuração com quatro capacitores que oferece um número maior de grau de liberdade para a compensação de todas as reatâncias indutivas do sistema. Em (35) é proposto um método eficiente para eliminar a divisão de frequência na transferência de energia.

## 3 SIMULAÇÃO

O uso da simulação computacional é extremamente importante para descrever o comportamento do sistema e é uma prática comum utilizada como maneira de modelar a realidade. Dentre as razões para essa postura destacam-se: a possibilidade de se verificar eventuais falhas de um sistema antes mesmo que ele seja implementado de fato, o dimensionamento dos dispositivos de segurança, a economia de capital, uma maior compreensão dos sistemas, uma maior eficiência dos equipamentos, além de ser uma forma segura e relativamente barata de se fazer testes e implementações, dentre outros.

Nesta seção é apresentada, por meio de simulações, a transferência de energia e a eficiência na transmissão pelo sistema WPT por acoplamento indutivo ressonante considerando a aplicação para o carregamento de uma bateria portátil. Por se tratar de aplicação de curto alcance, um sistema com duas bobinas foi adotado para análise.

### 3.1 Modelo de Referência

O estudo de simulação, a seguir, é realizado sobre um modelo apresentado em (29), um sistema com duas bobinas planares circulares e quatro capacitores que, segundo o autor, compensa todas as reatâncias indutivas das bobinas, próprias e mútua, como mostra o circuito equivalente na Figura 17.

Figura 17 - Modelo equivalente de um sistema WPT com quatro capacitores de compensação. A carga R<sub>L</sub> é considerada puramente resistiva.



Fonte: MOTTA, 2016. (29)

Nesse circuito a análise matemática para obtenção dos valores dos capacitores de compensação se torna complexa; dessa forma, foi utilizado um algoritmo de busca para os capacitores de compensação que utiliza um banco de dados de valores comerciais e o aplica para calcular os valores ótimos de potência e eficiência (29).

O circuito equivalente completo com os parâmetros já determinados, obtido em (29), é apresentado na Figura 18. Foram utilizados uma fonte senoidal, um gerador de sinal e

amplificador, fornecendo 10 V de amplitude a uma frequência de 500 kHz, sendo esta a frequência de ressonância do sistema. A carga  $R_L$ , puramente resistiva, é considerada pela literatura um valor de 47  $\Omega$  como uma estimação razoável de uma carga do tipo bateria (36). Em (29) a geometria das bobinas foi escolhida com base em uma análise dos coeficientes de acoplamento para diferentes topologias de bobinas planares; dentre as apresentadas, a circular, Figura 19, foi a que apresentou melhor resultado de acoplamento magnético. As resistências dos capacitores (ESR - *Equivalent Serie Resistance*) foram medidas em (29), tanto teoricamente, através do algoritmo de busca que assume ESR = 0.15%, quanto experimentalmente, sendo neste caso utilizado a frequência de 100 kHz devido à limitação do equipamento de medição. Para a simulação neste trabalho, utilizou-se os dados reais medidos em (29) para os capacitores.



Figura 18 - Circuito equivalente utilizado para simulação.

Fonte: MOTTA, 2016. (29)





Fonte: PORTO, 2014. (20)

Os parâmetros do circuito projetado foram otimizados para uma distância de separação de 1 mm entre as bobinas cujas características construtivas estão resumidas na Tabela 1. Os resultados obtidos para tensão e potência ativa de saída, comparando ESR simulado e real, são apresentados na Figura 20 (29).

	Rohina	Rohina
Parâmetros	Transmissora	Receptora
N° de espiras	44	36
Diâmetro interno	1 mm	1 mm
Diâmetro externo	46 mm	36 mm
Indutância	36.06 µH	19.53 µH
Resistência	7.776 Ω	5.697 Ω

Tabela 1 - Parâmetros construtivos das bobinas no modelo apresentado na Figura 17.

Figura 20 - Resposta da tensão de saída (a) e potência média de saída (b) para os casos de capacitores a 0.15% de ESR e para o caso de capacitores a ESR reais.



Fonte: MOTTA, 2016. (29)

#### 3.2 Simulação realizada com carga resistiva

Com base no modelo apresentado anteriormente foi realizado um estudo de simulação do sistema WPT, utilizando a plataforma MATLAB/SIMULINK. A simulação consistiu em analisar duas configurações: primeiramente com dois capacitores (S-S) – dividido em dois casos – e em seguida com quatro capacitores. Os parâmetros adotados para as simulações são os mesmos que os apresentados em (29) e mostrados na Figura 18; com exceção das capacitâncias para a configuração com dois capacitores de compensação.

Por se tratar de simulações e para que a comparação entre as duas configurações não seja comprometida devido ao fato de não medir experimentalmente o ESR para diferentes valores de frequência e capacitância, os capacitores foram considerados ideais, ou seja, a resistência interna (ESR) é nula.

### 3.2.1 Quatro Capacitores de Compensação

A configuração com quatro capacitores já foi apresentada, anteriormente, como modelo de referência. Na Figura 21, está representado o circuito montado para simulação utilizando a ferramenta MATLAB/SIMULINK. O propósito é realizar uma simulação e verificar o comportamento do sistema, a potência de saída, com a variação da frequência e da distância de separação entre as bobinas. A distância entre as bobinas é representada na simulação pelo valor da indutância mútua calculada pelo uso das expressões (2.9) a (2.11) escolhendo S=s=30, que corresponde à subdivisão em 61 anéis no método utilizado. Para a frequência de 500 kHz, os parâmetros estão listados nas Tabelas 2 e 3.





Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Tabela 2 - Capacitâncias correspondentes para frequência de ressonância de 500 kHz.

$f_0$	$\mathbf{C}_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
500 kHz	57.3 pF	2.11 nF	1.8 nF	192 pF

Tabela 3 – Parâmetros ajustados a uma frequência de ressonância de 500 kHz para um sistema com quatro capacitores de compensação.

d (mm)	k	M (µH)
1	0.714	18.945
5	0.450	11.950
10	0.264	7.004
15	0.162	4.302
20	0.104	2.761

Os resultados obtidos mostram na Figura 22 a curva de tensão e a curva de potência de saída, ambas em relação à distância de separação entre as bobinas, enquanto a Figura 23 apresenta as curvas de tensão e potência de saída, ambas em relação à frequência.



Figura 22 - Quatro capacitores: Tensão (a) e potência (b) de saída em função da distância entre as bobinas.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.



Figura 23 - Quatro capacitores: Tensão (a) e potência (b) de saída em função da frequência.

Como observado na Figura 22, o ponto de máxima transferência de energia, conforme otimizado e ajustado pela ferramenta computacional em (29), ocorre na distância de 1 mm de

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

separação entre as bobinas. Na Figura 23, as curvas referentes a cada distância, entre as bobinas, em função da frequência são apresentadas; para os parâmetros otimizados o ponto de transferência máxima ocorre na frequência de ressonância do sistema – 500 kHz – sem o efeito da divisão de frequência, porém, para distância diferente da projetada o ponto de máxima transferência é deslocado para frequências adjacentes. Para a distância de 1 mm, os resultados obtidos para tensão (pico) e potência de saída foram, respectivamente, 9.73 V e 1 W com a eficiência de transmissão de 74%.

### 3.2.2 Dois Capacitores de Compensação

Para a configuração com dois capacitores é o mesmo procedimento do tópico anterior, exceto pela remoção dos capacitores paralelos ( $C_1 \ e \ C_4$ ), como pode-se verificar na Figura 24.Os valores de  $C_2 \ e \ C_3$  são obtidos através de análise matemática.



Figura 24 - Circuito montado no Simulink para a configuração com dois capacitores.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Inicialmente, resolvendo as equações de malha obtidas da Figura 24, tem-se:

$$\begin{cases} V_{S} - R_{S}I_{S} + j\frac{1}{\omega c_{2}} - j\omega L_{1} - R_{1}I_{S} + j\omega MI_{L} = 0\\ -R_{L}I_{L} + j\frac{1}{\omega c_{3}} - j\omega L_{2} - R_{2}I_{L} + j\omega MI_{S} = 0 \end{cases}$$
(3.1)

Onde  $R_1$  é a resistência interna da bobina  $L_1$ ,  $R_2$  a resistência interna da bobina  $L_2$ ,  $I_S$  é a corrente do circuito primário e  $I_L$  a corrente de carga.

Resolvendo o sistema (3.1), obtém-se a corrente de carga  $I_{L.}$ 

$$I_L = \frac{j\omega MV_S}{[(R_S + R_1)(R_2 + R_L) - X_1 X_2 + \omega^2 M^2] + j[(R_S + R_1) X_2 + (R_2 + R_L) X_1]}$$
(3.2)

Onde  $X_1$  e  $X_2$  são as reatâncias dos ressonadores transmissor e receptor, respectivamente,

$$X_1 = \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_2}$$

$$X_2 = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}$$
(3.3)

A potência de saída sobre a carga é dada por:

$$P_L = |I_L|^2 R_L \tag{3.4}$$

O estudo desta configuração foi dividido em dois casos, os quais o primeiro é o normalmente utilizado baseado em anulação das reatâncias dos ressonadores. O segundo caso, tende pra uma análise de otimização do primeiro, o qual ajusta a máxima transferência de energia para a distância projetada.

### 3.2.2.1 Caso 1: Anulação das reatâncias dos ressonadores

Neste primeiro caso as reatâncias das bobinas são anuladas pelos capacitores de compensação, isso é,  $X_1$  e  $X_2$  na expressão (3.3) são iguais a zero. Desta maneira a expressão (3.2) torna-se

$$I_L = \frac{j\omega M V_S}{(R_S + R_1)(R_2 + R_L) + \omega^2 M^2}$$
(3.5)

De (3.5) pode-se observar que a corrente de carga é limitada pelas perdas ôhmicas, frequência e indutância mútua. Utilizando novamente as expressões (2.9) a (2.11) e (3.3), os parâmetros calculados a uma frequência de 500 kHz estão listados nas Tabelas 4 e 5. Note que os valores das Tabelas 3 e 5 são iguais, pois a indutância mútua depende somente dos parâmetros geométricos das bobinas.

As curvas de tensão e potência de saída, para cada valor de frequência de ressonância ajustada, em relação à distância de separação entre as bobinas pode ser vista na Figura 25.

$f_0$	C <sub>2</sub>	C3
500 kHz	2.810 nF	5.188 nF

Tabela 4 - Caso 1: Capacitâncias correspondentes à frequência de ressonância de 500 kHz.

Tabela 5 – Caso1: Parâmetros ajustados a uma frequência de ressonância de 500 kHz para um sistema com dois capacitores de compensação.

d (mm)	k	M (H)
1	0.714	18.945
5	0.450	11.950
10	0.264	7.004
15	0.162	4.302
20	0.104	2.761

Figura 25 - Dois capacitores: Tensão (a) e potência (b) de saída para diferentes frequências de ressonância em função da distância entre as bobinas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Foram simuladas quatro curvas para diferentes frequências de ressonância do sistema; pode-se observar que com o aumento da frequência a curva é deslocada para direita, ou seja, atinge-se o ponto de máxima transferência de energia em maiores distâncias. Na Figura 26 estão mostradas as curvas de tensão e potência de saída em função da frequência para algumas distâncias. Para a distância de 1 mm, os valores obtidos para tensão (pico) e potência de saída foram, respectivamente, 7.05 V e 0.53 W com a eficiência de transmissão de 80%.



Figura 26 - Dois capacitores: Tensão (a) e potência (b) de saída em função da frequência.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Note que, no sistema com dois capacitores de compensação, ocorre o fenômeno de divisão de frequência, que agrava-se quanto menor a distância, e existe um ponto crítico, no qual ocorre a correspondência de impedância e a eficiência de transmissão é máxima no valor da frequência de ressonância. Para obtenção da distância crítica, visto no tópico 2.4, a expressão (2.19) foi deduzida através da expressão (2.7) para bobinas solenoides, porém, as bobinas utilizadas, nesta análise, são planares circulares e as expressões de (2.9) a (2.11) foram utilizadas, em vez da expressão (2.7), para o cálculo da indutância mútua. Dessa maneira, dificulta-se a análise para obter a distância crítica de forma explícita, devido à complexidade para o cálculo da indutância mútua. No entanto, pode-se determinar uma distância como ponto crítico e calcular o valor para a frequência correspondente, como é mostrado a seguir. Utilizando as expressões (2.6) e (2.17) tem-se,

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{(R_s + R_2)(R_3 + R_L)}{\omega_0^2}}$$
(3.6)

e, portanto,

$$f_{cr} = \sqrt{\frac{(R_s + R_2)(R_3 + R_L)}{4\pi^2 M^2}}$$
(3.7)

Na Tabela 6, estão listados os valores de frequência relacionados a cada distância para os casos bobinas solenoides (expressão 2.19) e para as bobinas planares circulares (expressão 3.7).

O efeito ocasionado pela divisão de frequência no sistema simulado, para uma frequência de ressonância de 500 kHz, foi mostrado na Figura 26. O ponto crítico para essa frequência corresponde a um k = 0.24 (d  $\approx$  11mm): abaixo deste valor – afastando as bobinas – a amplitude máxima ocorre exatamente na frequência de ressonância ajustada, porém, com baixa eficiência de transmissão; aumentando o valor de k – aproximando as bobinas – a amplitude da potência de saída diminui devido ao deslocamento da frequência de ressonância do sistema.

Tabela 6 - Frequência de ressonância em função da distância para máxima eficiência de transmissão.

d (mm)	1	5	10	15	20
Bobina solenoide	124 9 kHz	194 9 kHz	471 6 kHz	1 084 MHz	2 187 MHz
(2.19)	124.9 KHZ	174.7 KHZ	471,0 KHZ	1.004 10112	2.107 WHIL
Bobina planar	171.1 kHz	271 3 kHz	462 9 kHz	753 6 kHz	1 174 MHz
circular (3.7)	1 / 1.1 KHZ	271.3 KHZ	102.9 KHZ	700.0 KHZ	1.17 1 101112

O valor da distância de separação entre as bobinas para qual o sistema foi projetado é de 1 mm: pela Tabela 6 a frequência correspondente a essa distância é de 171,1 kHz; simulando para a nova frequência o resultado está apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Dois capacitores: Tensão (a) e potência (b) de saída em função da frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Pode-se observar, conforme foi descrito anteriormente, que para o ponto crítico e distâncias maiores não ocorre o efeito de divisão de frequência. Para a distância de 1 mm, os valores obtidos para tensão (pico) e potência de saída foram, respectivamente, 11.53 V e 1.41 W, com eficiência de transmissão de 45%. Sendo assim, os resultados obtidos nesta simulação ajustando a frequência para o ponto crítico foram melhores, em relação a eficiência de transmissão, do que os apresentados na configuração com quatro capacitores. Portanto, com base nessas análises o uso de dois capacitores atendeu a mesma aplicação com uma configuração mais simples. A seguir, será analisado o segundo caso.

### **3.2.2.2** Caso 2: Otimização dos capacitores

No caso anterior, foi visto o comportamento do sistema com a anulação das reatâncias dos ressonadores e que para cada distância de separação entre as bobinas existe uma frequência correspondente na qual ocorre a máxima transferência de energia.

Uma análise diferente foi abordada no segundo caso: ao invés de anular as reatâncias dos ressonadores, ou seja, tornar-se  $X_1$  e  $X_2$  nulos, foi realizado um cálculo de otimização da expressão (3.4), derivando-a e obtendo os pontos críticos em função de  $C_2$  e  $C_3$ .

$$\frac{\partial P_L}{\partial C_2} = 0 \tag{3.8}$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial C_2} = 0$$

Resolvendo as condições de (3.8) foram encontrados os valores de  $C_2$  e  $C_3$ , mostrados na expressão (3.9), para maximizar a potência de saída.

$$C_{2} = \frac{\omega L_{1}(R_{2}+R_{L}) - \sqrt{(R_{1}+R_{S})(R_{2}+R_{L})(\omega^{2}M^{2} - (R_{1}+R_{S})(R_{2}+R_{L}))}}{\omega((R_{1}+R_{S})^{2}(R_{2}+R_{L}) + \omega^{2}L_{1}^{2}(R_{2}+R_{L}) - \omega^{2}M^{2}(R_{1}+R_{S}))}$$

$$C_{3} = \frac{\omega^{2}C_{2}^{2}(R_{1}+R_{S})^{2} + (\omega^{2}L_{1}C_{2}-1)^{2}}{\omega^{2}(\omega^{2}L_{2}C_{2}^{2}(R_{1}+R_{S})^{2} - \omega^{2}C_{2}M^{2}(\omega^{2}C_{2}L_{1}-1) + L_{2}((\omega^{2}C_{2}L_{1}-1)^{2}+1))}$$
(3.9)

Pode-se observar que no Caso 1 o cálculo das capacitâncias depende somente da frequência e da autoindutância de cada bobina, ou seja, independe da distância entre elas,

fazendo com que ocorra a máxima transferência de energia somente no ponto crítico. Neste caso as capacitâncias passam a depender, também, da distância e dos parâmetros resistivos; dessa forma, para uma distância determinada pode-se maximizar a transferência de energia ajustando os capacitores. Para a frequência de ressonância de 500 kHz os valores estão mostrados na Tabela 7.

d (mm)	k	M (H)	C <sub>2</sub> (nF)	C <sub>3</sub> (nF)
1	0.714	18.945	2.360	1.545
5	0.450	11.950	2.537	2.227
10	0.264	7.004	2.732	3.841

Tabela 7 – Caso 2: Parâmetros ajustados a uma frequência de ressonância de 500 kHz para um sistema com dois capacitores de compensação.

Outra observação a ser feita é que a expressão (3.9) para o cálculo de  $C_2$  só é válida até a distância crítica, calculada em (3.6); acima desta distância o termo dentro da raiz quadrada se torna negativo.

Ajustando a distância para 1 mm, as curvas de tensão e potência de saída em relação à distância entre as bobinas está mostrado na Figura 28. Na Figura 29, as curvas de tensão e potência de saída em relação à frequência são apresentadas. Os resultados obtidos foram de 11.53 V e 1.42 W para tensão (pico) e potência de saída, respectivamente e a com eficiência de transmissão de 45%.

Figura 28 – Caso 2: Tensão (a) e potência (b) de saída em função da distância entre as bobinas. Capacitores ajustados para distância de 1 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.



Figura 29 – Caso 2: Tensão (a) e potência (b) de saída em função da frequência. Capacitores ajustados para distância de 1 mm.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Assim como na configuração com quatro capacitores, neste caso também houve diminuição do efeito da divisão de frequência; entretanto, há também um pequeno deslocamento do ponto de máxima transferência para frequências adjacentes quando posicionados em diferentes distâncias da projetada devido ao fato de ajustar os capacitores para a distância desejada, como mostra na Figura 29.

### 3.3 Simulação Aplicada: Carregamento de bateria

Foi visto até o momento que a configuração com dois capacitores apresentou uma melhor aplicação em relação à simplicidade do circuito e à flexibilidade de ajustar a máxima transferência de energia para a distância desejada, dentro do alcance máximo. Assim, dando prosseguimento a simulação, foi aplicada a técnica para o carregamento de uma bateria portátil.

O circuito completo montado para o carregamento da bateria é apresentado na Figura 30. Foi adicionado, no lado primário, um conversor de imitância para manter estável a tensão de saída, pois a mesma varia com carga; a rede de imitância LCL (indutância-capacitância-indutância) foi apresentada em (37) combinada com a topologia ressonante S-S como uma técnica para manter a tensão de saída constante; e no secundário foi adicionado um conversor *buck* na saída para o carregamento da bateria.





Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Para a simulação com a bateria, especificou-se a distância de 1 mm e uma frequência de ressonância de 171.1 kHz, vide Tabela 6; os parâmetros estão mostrados na Tabela 8 e a curva de carga simulada na Figura 31.

d	1 mm	L <sub>2</sub>	19.53 µH
f	171.1 kHz	k	0.714
Vs (pico)	10 V	Μ	18.94 µH
Rs	0.1 Ω	L <sub>s1</sub>	25 μΗ
<b>C</b> <sub>2</sub>	24 nF	Ls2	25 μΗ
<b>C</b> 3	44.3 nF	Ср	34.61 nF
L <sub>1</sub>	36.06 µH	Vnom, Bateria	5 V

Tabela 8 - Simulação Bateria: Parâmetros

Figura 31 - Carregamento de uma bateria de 5 V de tensão nominal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Enfim, como mostrado na curva de carregamento simulada, a bateria foi totalmente carregada atingindo a sua tensão nominal.

## 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi feita uma breve descrição sobre a tecnologia WPT por acoplamento indutivo ressonante, um estudo que ressurgiu recentemente com um grupo de pesquisadores do MIT em 2007. Esta técnica permite transmitir energia para curtas e médias distâncias através de campos magnéticos e vem ganhando mercado com desenvolvimentos para novas aplicações em diversas áreas.

Foram realizadas simulações com o intuito de comparar a literatura com os resultados obtidos entre as configurações com dois capacitores e com quatro capacitores de compensação. Para a configuração com quatro capacitores os resultados obtidos mostraram uma diminuição no efeito de divisão de frequência. Já na configuração com dois capacitores foram divididas as análises em dois casos. No primeiro caso, anulando as reatâncias dos ressonadores, foi observado um ponto crítico onde ocorre a máxima transferência de energia, e para distâncias abaixo desse ponto o efeito de divisão de frequência se agrava reduzindo a eficiência de transmissão; foi observado também, a possibilidade de alterar o ponto crítico para a distância desejada ajustando a frequência de ressonância do sistema. No segundo caso analisado, ajustando os valores dos capacitores, foi possível atingir a máxima transferência de energia – como no primeiro caso quando ajustado a frequência de transmissão, do que os métodos anteriores, atingindo uma tensão (pico) e potência de saída de 11.53 V e 1.42 W, respectivamente. Por fim, foi aplicada a técnica WPT simulando a curva de carga de uma bateria típica e o resultado comprovou que a bateria foi completamente carregada.

### 4.1 Sugestão de Trabalhos Futuros

Uma proposta para trabalho futuro é a montagem experimental dos casos estudados.

Outra proposta válida é o desenvolvimento de um sistema de compensação dinâmica para obtenção de máxima transferência de potência, ajustando a frequência de ressonância do sistema ou os valores dos capacitores.

Mais uma proposta, utilizar os valores comerciais de capacitores e seus respectivos ESR's para uma análise mais realística do sistema indutivo ressonante.

Por fim, sugere-se o estudo mais aprofundado do fenômeno de divisão de frequência por meio do diagrama de bode.

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- FERNANDES, Eduardo Luís Oliveira. Transmissão de potência sem fios. 2015. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2015.
- (2) SOUZA, Wanberton Gabriel de. Análise experimental da transmissão de energia sem fios por modos ressonantes. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- (3) TESLA: SCIENCE CENTER AT WARDENCLYFFE. **Wardenclyffe.** Disponível na URL http://www.teslasciencecenter.org/wardenclyffe, acessada no dia 28/10/16.
- (4) KURS, André. **Power transfer through strongly coupled resonances**, 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência em Física). Departamento de Física, MIT, 2007.
- (5) MOFFATT, Robert Alexander. Wireless transfer of electric power, 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Ciência em Física). – Departamento de Física, MIT, 2009.
- (6) WITRICITY. **WiT-5000C3**. Disponível na URL http://witricity.com/products/wit-5000c3, acessada no dia 30/10/16.
- (7) TARGETHD. Conheça as vantagens da tecnologia de recarga de bateria sem fio para smartphones. Disponível na URL http://targethd.net/conheca-as-vantagens-datecnologia-de-recarga-de-bateria-sem-fio-para-smartphones/, acessada no dia 04/11/16.
- (8) DAI, Zhongyu, et al. A witricity-based high-power device for wireless charging of electric vehicles. *Energies*, 2017, 10.3: 323.
- (9) JORGETTO, Marcus FC, et al. Wireless power transmission applied to pure electric vehicle. In: *Industrial Electronics Society, IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE*. IEEE, 2017. p. 5358-5363.
- (10) AHN, Dukju; HONG, Songcheol. Wireless power transmission with self-regulated output voltage for biomedical implant. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61.5: 2225-2235.
- (11) CHENG, Yuhua, et al. Modeling and optimization of single-turn printed coils for powering biomedical implants. In: *Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2017 IEEE*. IEEE, 2017. p. 1-3.

- (12) KESLER, Morris. Highly resonant wireless power transfer: safe, efficient, and over distance. *Witricity corporation*, 2013, 1-32.
- (13) WIKIPEDIA. Wireless Power Transfer. Disponível na URL https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless power transfer, acessada no dia 07/11/17.
- (14) OSHA. Electromagnetic Radiation and How It Affects Your Instruments. Near Field vs. Far Field. Disponível na URL https://www.osha.gov/SLTC/radiofrequencyradiation/electromagnetic\_fieldmemo/elec tromagnetic.html, acessada no dia 07/11/17.
- (15) VILLA, J. L., SALLÁN, J., LLOMBART, A., & SANZ, J. F. (2009). Design of a high frequency inductively coupled power transfer system for electric vehicle battery charge. *Applied Energy*, 86(3), 355-363.
- (16) SALLÁN, J., VILLA, J. L., LLOMBART, A., & SANZ, J. F. (2009). **Optimal design** of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *56*(6), 2140-2149.
- (17) MOSTAFA, T. M., MUHARAM, A., & HATTORI, R. (2017, May). Wireless battery charging system for drones via capacitive power transfer. In *Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), 2017 IEEE PELS Workshop on* (pp. 1-6). IEEE.
- (18) BBC. Wireless Recharging: Pulling the plug on electric cars. Disponível na URL http://www.bbc.com/future/story/20121120-pulling-the-plug-on-electric-cars, acessada no dia 09/11/17.
- (19) BARMAN, S. D.; REZA, A. W.; KUMAR, N.; KARIM, M. E.; MUNIR, A. B.. Wireless powering by magnetic resonant coupling: Recent trends in wireless power transfer system and its applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 51, 1525-1552.
- (20) PORTO, R. W.; BRUSAMARELLO, V. J.; MULLER, I.; SOUSA1, F. R.; AZAMBUJA, R.. **Design and Optimization of a Power Inductive Link**. I2MTC Proceedings. 2014 IEEE International. Jul, 2014.
- (21) **"Ressonância"** em Só Física. Virtuous Tecnologia da Informação, 2008-2018. Consultado em 28/06/2018 às 09:45. Disponível na Internet em http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/ressonancia.php.

- (22) WIRELESS POWER CONSORTIUM. **Coupling Factor**. Disponível na URL https://www.wirelesspowerconsortium.com/technology/coupling-factor.html, acessada no dia 10/12/17.
- (23) MUR-MIRANDA, JO; FANTI, G.; YIFEI, F.; OMANAKUTTAN, K.; ONGIE, R; SETJOADI, A.; et al. Wireless power transfer using weakly coupled magnetostatic resonators. In: Proceedings of the Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE); 2010. p. 4179–86.
- (24) SILVA, Marcus Tadeu Pinheiro. *Métodos de projeto para o acoplamento indutivo aplicado a implantes biomédicos.* Diss. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- (25) VINGE, Rikard. Wireless Energy Transfer By Resonant Inductive Coupling. Master's thesis, Chalmers University of Technology, 2015.
- (26) KIANI, M.; GHOVANLOO, M. The circuit theory behind coupled-mode magnetic resonance-based wireless power transmission. *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regul. Pap.* **2012**, *59*, 2065-2074.
- (27) HUI, Shu Yuen Ron; ZHONG, Wenxing; LEE, Chi Kwan. A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29.9: 4500-4511.
- (28) TWENTY FIRST CENTURY BOOKS. MIT Witricity Not So Original After All. Disponível na URL https://www.wirelesspowerconsortium.com/technology/coupling-factor.html, acessada no dia 17/12/17.
- (29) MOTTA, Tiago da Silva. TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM-FIO: Método de Acoplamento Indutivo Ressonante. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- (30) R. AZAMBUJA, V. J. BRUSAMARELLO, S. HAFFNER, R. W. PORTO. Analysis and Optimization of an Inductive Power Transfer With a Randomized Method. IEEE. 2014.
- (31) SAMPLE, Alanson P.; MEYER, David T.; SMITH, Joshua R. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58.2: 544-554.

- (32) ZHANG, Yiming; ZHAO, Zhengming; CHEN, Kainan. Frequency splitting analysis of magnetically-coupled resonant wireless power transfer. In: *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE*. IEEE, 2013. p. 2227-2232.
- (33) HUANG, Runhong, et al. Frequency splitting phenomena of magnetic resonant coupling wireless power transfer. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, 50.11: 1-4.
- (34) CHAIDEE, Ekkachai, et al. Influence of distance and frequency variations on wireless power transfer. In: *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2017 14th International Conference on.* IEEE, 2017. p. 572-575.
- (35) LYU, Y. L., MENG, F. Y., YANG, G. H., CHE, B. J., WU, Q., SUN, L., ... & LI, J. L. W. (2015). A method of using nonidentical resonant coils for frequency splitting elimination in wireless power transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(11), 6097-6107.
- (36) S. CHEON, Y. H. KIM, S.Y. KANG, M. L. LEE, J. M. LEE, T. ZYU. Circuit-Model-Based Analysis of a Wireless Energy-Transfer System via Coupled Magnetic Resonances. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Jun, 2010.
- (37) NAN, Lan Jianyu Yang; KAIYU, Li. A novel resonant network for a WPT system with constant output voltage. In: *Energy Internet and Energy System Integration* (*E12*), 2017 IEEE Conference on. IEEE, 2017. p. 1-5.