

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

LUCAS RICKEN GARCIA

**DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DE BOBINAS IMPLANTÁVEIS VIA  
SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2016

LUCAS RICKEN GARCIA

**DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DE BOBINAS IMPLANTÁVEIS VIA  
SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo José Abatti

**CURITIBA**

**2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

G216d  
2016 Garcia, Lucas Ricken  
Determinação da posição de bobinas implantáveis via sistema de transferência de energia sem fio / Lucas Ricken Garcia.-- 2016.  
78 f. : il. ; 30 cm.

Texto em português, com resumo em inglês  
Disponível também via World Wide Web  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2016  
Bibliografia: f. 74-76

1. Transmissão de energia sem fio. 2. MATLAB (Programa de computador). 3. Materiais biomédicos. 4. Implantes artificiais. 5. Bobinas. 6. Circuitos magnéticos. 7. Engenharia elétrica - Dissertações. I. Abatti, Paulo José, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, inst. III. Título.

---

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Dissertação Nº. \_\_\_\_\_

# **Determinação da Posição de Bobinas Impantáveis Via Sistema de Transferência de Energia Sem Fio.**

por

**Lucas Ricken Garcia**

**Orientador: Prof. Dr. Paulo José Abatti (UTFPR)**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: **ENGENHARIA BIOMÉDICA** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 14h do dia 26 de setembro 2016. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

---

Prof. Dr. Paulo José Abatti  
(Presidente – UTFPR)

---

Prof. Dr. Gerson Linck Bichinho  
(PUC-PR)

---

Prof. Dr. Gilson Yukio Sato  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Humberto Remigio Gamba  
(UTFPR)

Visto da coordenação:

---

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.  
(Coordenador do CPGEI)

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que me fortalece a cada dificuldade. A meus pais, Valdomiro e Valmira, por me educarem com sabedoria e grande dedicação, sempre presentes nestes quase dois anos de mestrado. Ao companheirismo do meu irmão Hugo. À minha namorada Thaysa, deixo um agradecimento especial. Obrigado pelo companheirismo, lealdade e compreensão, sempre compartilhando tanto os momentos felizes quanto os mais difíceis.

Agradeço ao Prof. Paulo José Abatti, pelo apoio e orientação incondicionais, sempre transferindo conhecimento e experiência com maestria. Aos professores e pesquisadores do CPGEI, em especial à Alessandra, André, Caio, Carlos, Diego, Pedro e Toledo (o escolhido). Obrigado pelas risadas, discussões, conselhos e pelo apoio durante todo este período de constante estudo e aprendizado.

## RESUMO

GARCIA, Lucas. DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DE BOBINAS IMPLANTÁVEIS VIA SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO. 78 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho apresenta o estudo de um método para a determinação da posição e orientação de uma bobina implantável em relação à bobina transmissora localizada externamente ao paciente. No aspecto elétrico, conhecer a posição e orientação da bobina implantada permite um maior domínio sobre o posicionamento do enlace e, conseqüentemente, das características de eficiência e potência entregue ao secundário, *i.e.* ao *IMD*. Já no aspecto clínico, detectar e determinar a posição da bobina implantável e, se possível, do *IMD*, pode auxiliar na determinação de possíveis movimentações do dispositivo na região implantada que podem influenciar o seu desempenho. Neste sentido, realizou-se análises teóricas a cerca da indutância mútua, do coeficiente de acoplamento magnético e de sistemas de transferência de energia sem fio (*WPT*) a duas bobinas. Por meio do modelo matemático implementado no software *Matlab* e o projeto experimental de sistemas de *WPT* a duas bobinas, avaliou-se a influência de desalinhamentos laterais e angulares sobre o acoplamento magnético. A partir das características observadas, descreveu-se os procedimentos necessários para estimar a posição e orientação relativa da bobina do dispositivo implantável apenas mensurando os parâmetros elétricos do primário. Em uma avaliação preliminar, por meio de testes virtuais, observou-se um erro médio e incerteza padrão na determinação da posição relativa de 2,4 mm e 1,1 mm, respectivamente, que se comparada às dimensões das bobinas (40 mm de diâmetro para bobina externa e 5,5 mm para a bobina implantável) indicam uma exatidão adequada. Para a determinação do ângulo relativo o método também apresentou resultados promissores, uma vez que o erro médio foi de 7° e a incerteza padrão obtida de 8,2°. Desta forma, o método estudado possibilita o desenvolvimento de equipamentos para determinação da posição e orientação relativa de uma bobina implantável mensurando apenas a corrente no primário, sem a necessidade de circuitos adicionais no *IMD* ou a utilização de equipamentos de imagem médicos.

**Palavras-chave:** Transferência de energia sem fio, Dispositivos implantáveis, Bobinas implantáveis

## ABSTRACT

GARCIA, Lucas. IMPLANTABLE COIL DETERMINATION POSITION VIA WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM. 78 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This paper presents the study of a method for determining the implanted coil position and orientation relative to the transmitter coil externally located to the patient. In the electrical aspect, knowing the implanted coil position and orientation allows greater control over the placement of the link and thus the efficiency of features and power delivered to the secondary, *i.e.* the *IMD*. In the clinical aspect, detect and determine the implantable coil position, if possible, the *IMD* can assist in determining possible device movements in the implanted area that can influence their performance. In this sense, a theoretical analysis about the mutual inductance, the magnetic coupling coefficient and two coils wireless power transfer (*WPT*) systems was realized. Through mathematical model implemented in Matlab and experimental design of two coil *WPT* systems, the influence of lateral and angular misalignment on the magnetic coupling was assessed. From the observed characteristics, was described the necessary procedures to estimate the relative position and orientation of the implantable device coil only measuring the primary electrical parameters. In a preliminary evaluation, through virtual testing, there was an average error and standard deviation in determining the relative position of 2.4 mm and 1.1 mm, respectively, compared to the dimensions of the coils (40 mm diameter to external coil and 5.5 mm for implantable coil) indicate adequate accuracy. To the relative angle the method also yielded promising results, since the average error was  $7^\circ$  and the standard deviation obtained  $8.2^\circ$ . Thus, the method studied enables the development of equipment for determining the implanted coil relative position and orientation measuring only the primary current without the need for additional circuitry in *IMD* or the use of medical imaging equipment.

**Keywords:** Wireless Power Transfer, Implantable devices, Implantable coils

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Exemplo de um implante coclear. ....	14
FIGURA 2	– Dispositivo de estimulação gástrica. ....	15
FIGURA 3	– Diagrama esquemático de um sistema de <i>WPT</i> a duas bobinas com dupla ressonância. ....	19
FIGURA 4	– Ilustração de um sistema para determinação da posição de uma cápsula endoscópica. ....	25
FIGURA 5	– Ilustração de um sistema para determinação da posição de uma bobina implantada por meio de uma matriz de bobinas. ....	26
FIGURA 6	– Disposição de um enlace indutivo para duas bobinas (a) alinhadas e (b) desalinhadas lateralmente. ....	28
FIGURA 7	– (a) Vista lateral de duas bobinas alinhadas e (b) vista frontal de duas bobinas desalinhadas lateralmente. ....	28
FIGURA 8	– Disposição de um enlace indutivo para uma situação de desalinhamento angular. ....	28
FIGURA 9	– Disposição de um enlace indutivo para uma situação geral considerando desalinhamentos laterais e angulares ....	29
FIGURA 10	– Circuito equivalente de duas bobinas acopladas magneticamente. ....	30
FIGURA 11	– Diagrama do esquema para obtenção da curva prática do coeficiente de acoplamento. ....	31
FIGURA 12	– Diagrama esquemático de um sistema de transferência sem fio. ....	32
FIGURA 13	– Diagrama esquemático do sistema de <i>WPT</i> estudado. ....	36
FIGURA 14	– Bobinas $L_1$ e $L_2$ confeccionadas seguindo as especificações da Tabela 1. ....	38
FIGURA 15	– Comportamento prático e teórico do coeficiente de acoplamento magnético para diferentes valores de $c$ . ....	39
FIGURA 16	– Estrutura de testes confeccionada para realização dos ensaios experimentais. ....	40
FIGURA 17	– Comportamento prático e teórico da eficiência energética e da potência relativa do sistema de <i>WPT</i> projetado. ....	41
FIGURA 18	– Comportamento prático e teórico da eficiência energética para diferente valores de carga. ....	42
FIGURA 19	– Comportamento prático e teórico da potência relativa entregue ao secundário para diferente valores de carga. ....	42
FIGURA 20	– Comportamento da $P_2/P_{2max}$ e $\eta$ em relação ao $k$ para $R_L$ igual a $2\text{ k}\Omega$ e $10,9\ \Omega$ . ....	43
FIGURA 21	– Comportamento prático e teórico da $P_2/P_{2max}$ e da eficiência energética $\eta$ para $R_s = 7,19\ \Omega$ e $R_L = 6,56\ \Omega$ . ....	44
FIGURA 22	– Disposição das bobinas $L_1$ e $L_2$ para investigação da influência do desalinhamento lateral sobre a <i>MPT</i> . ....	45
FIGURA 23	– Influência do desalinhamento lateral sobre a <i>MPT</i> . ....	46
FIGURA 24	– Disposição das bobinas $L_1$ e $L_2$ para investigação da influência do desalinhamento lateral sobre a condição de <i>MPT</i> para diferentes valores de $e$ . ....	46



FIGURA 25	– Comportamento da corrente no primário para condição de <i>MPT</i> considerando diferentes desalinhamento verticais. ....	47
FIGURA 26	– Disposição das bobinas $L_1$ e $L_2$ para investigação da influência do desalinhamento lateral e angular sobre a condição de <i>MPT</i> considerando $\theta$ igual a $0^\circ$ , $30^\circ$ , $45^\circ$ e $60^\circ$ . ....	48
FIGURA 27	– Comportamento da corrente no primário para condição de <i>MPT</i> considerando $e = 0mm$ e $\theta$ igual a $0^\circ$ , $30^\circ$ , $45^\circ$ e $60^\circ$ . ....	49
FIGURA 28	– Comportamento da corrente no primário para condição de <i>MPT</i> considerando $e = 20mm$ e $\theta$ igual a $0^\circ$ , $30^\circ$ , $45^\circ$ e $60^\circ$ . ....	49
FIGURA 29	– Diagrama do esquema para obtenção da curva prática do coeficiente de acoplamento. ....	50
FIGURA 30	– Bobinas $L_1$ e $L_2$ confeccionadas. ....	52
FIGURA 31	– Coeficiente de acoplamento magnético prático e teórico. ....	52
FIGURA 32	– Módulo e fase da impedância do primário (sem a resistência da fonte) mensurado no analisador de impedância. ....	53
FIGURA 33	– Módulo e fase da impedância do secundário mensurado no analisador de impedância. ....	54
FIGURA 34	– Curvas características do sistema de <i>WPT</i> projetado. ....	55
FIGURA 35	– Comportamento do sistema de <i>WPT</i> para diferentes desalinhamentos laterais para $\theta = 0^\circ$ . ....	56
FIGURA 36	– Ilustração do comportamento do sistema de <i>WPT</i> avaliando a corrente relativa no primário. ....	57
FIGURA 37	– Ilustração do comportamento do sistema de <i>WPT</i> avaliando a corrente relativa no primário. ....	57
FIGURA 38	– Ilustração do comportamento do sistema de <i>WPT</i> avaliando a corrente relativa no primário para $\theta = 0^\circ$ . ....	60
FIGURA 39	– Ilustração do acoplamento entre duas bobinas com $\theta = 90^\circ$ a) alinhadas e b) desalinhadas lateralmente. ....	60
FIGURA 40	– Ilustração do comportamento do sistema de <i>WPT</i> avaliando a corrente relativa no primário para $\theta \neq 0^\circ$ . ....	60
FIGURA 41	– Relação entre a distância de intersecção da curva de corrente relativa e deslocamento lateral $e$ para diferentes $\theta$ . ....	61
FIGURA 42	– Relação entre a distância de intersecção da curva de corrente relativa e ângulo relativo $\theta$ para diferentes valores de $e$ . ....	62
FIGURA 43	– Ilustração do procedimento para detecção da distância $d_p$ considerando uma bobina implantada com um ângulo relativo à pele $\phi$ . ....	63
FIGURA 44	– Relação entre a distância de intersecção da curva de corrente relativa e deslocamento lateral $e$ para diferentes $\theta$ . ....	63
FIGURA 45	– Ilustração do procedimento para ajuste do desalinhamento angular. ....	65
FIGURA 46	– Situações ao qual foram aplicados (a) ajuste no desalinhamento lateral e (b) ajuste no desalinhamento angular. ....	66
FIGURA 47	– Ilustração do procedimento para ajuste do eixo $z'$ . ....	66
FIGURA 48	– Ilustração do (a) posicionamento relativo das bobinas levando em consideração os possíveis desvios do método. (b) Ajuste do ângulo relativo para definição do desvio lateral $e_{x,y}$ e (c) vista do plano $xy$ e o desvio $e_{x,y}$ . ....	67
FIGURA 49	– (a) Definição do desvio angular $\theta'$ e (b) a ocorrência de uma variação na rotação do eixo $x'$ em relação a $x$ . ....	67
FIGURA 50	– Posições determinadas pela aplicação do método considerando um dis-	

	positivo com resolução lateral de 5 mm. ....	68
FIGURA 51	– Posições determinadas pela aplicação do método considerando um dispositivo com resolução lateral de 5 mm. ....	69
FIGURA 52	– Circuito para aquisição dos pontos experimentais de acordo com o nível de corrente desejado. ....	77

## LISTA DE SIGLAS

<i>IMDs</i>	Dispositivos médicos implantáveis
<i>IEEE</i>	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
<i>AIMDs</i>	Dispositivos médicos implantáveis ativos
<i>WPT</i>	Transferência de energia sem fio
<i>F-IMEHD</i>	Dispositivo auditivo no ouvido médio totalmente implantável
<i>GPR</i>	Radar de penetração no solo
RF	Radiofrequência
<i>RFID</i>	Identificação por RF
<i>PSO</i>	Otimização por enxame de partículas
<i>MPT</i>	Máxima Transferência de Potência
PVC	Policloreto de polivinila

## LISTA DE SÍMBOLOS

$L_1$	Indutância da bobina do primário
$L_2$	Indutância da bobina do secundário
$x$	Eixo x da bobina implantável
$y$	Eixo y da bobina implantável
$z$	Eixo z da bobina implantável
$x'$	Eixo x da bobina externa
$y'$	Eixo y da bobina externa
$z'$	Eixo z da bobina externa
$c$	Distância em z entre as bobinas
$d$	Deslocamento horizontal relativo
$\theta$	Ângulo relativo entre as bobinas
$M$	Indutância Mútua
$k$	Coefficiente de acoplamento magnético
$v_1$	Tensão sobre $L_1$
$v_2$	Tensão nos terminais abertos de $L_2$
$C_1$	Capacitância de compensação do primário
$C_2$	Capacitância de compensação do secundário
$R_1$	Soma das perdas dos componentes do primário
$R_2$	Soma das perdas dos componentes do secundário
$R_L$	Resistência de Carga
$P_1$	Potência elétrica dissipada no primário
$P_2$	Potência transmitida ao secundário
$P_{2max}$	Potência máxima possível no secundário
$P_2/P_{2max}$	potência transmitida relativa
$\eta$	Eficiência energética do sistema
$i_1/i_{1max}$	corrente relativa no primário
$\omega_0$	Frequência de ressonância angular
$d_p$	Comprimento do segmento de reta formado por dois pontos da curva de $i_1/i_{1max}$
$\phi$	Ângulo relativo à pele
$P'$	Origem da bobina externa
$\alpha$	Ângulo entre os eixos $x$ e $x'$
$P$	Origem da bobina implantada projetado em z
$e_{x,y}$	Desvio lateral entre as bobinas

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	DISPOSITIVOS MÉDICOS IMPLANTÁVEIS E MOTIVAÇÃO	13
1.2	OBJETIVO DESTE TRABALHO	16
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
<b>2</b>	<b>ESTUDO DE SISTEMAS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO E DISPOSITIVOS IMPLANTÁVEIS</b>	<b>18</b>
2.1	SISTEMAS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO	18
2.2	ALGUMAS APLICAÇÕES DE SISTEMAS <i>WPT</i> AOS DISPOSITIVOS MÉDICOS IMPLANTÁVEIS	21
2.3	TÉCNICAS PARA ESTIMAÇÃO DA POSIÇÃO DE UMA BOBINA OU DISPOSITIVO IMPLANTADO	24
<b>3</b>	<b>ANÁLISE TEÓRICA DA INDUTÂNCIA MÚTUA E SISTEMAS <i>WPT</i> COM DUAS BOBINAS</b>	<b>27</b>
3.1	COEFICIENTE DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO E INDUTÂNCIA MÚTUA	27
3.1.1	Situações de Desalinhamento e Cálculo da Indutância mútua	27
3.1.2	Coeficiente de Acoplamento Magnético	29
3.2	SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO	31
3.2.1	Corrente relativa no primário	34
3.3	ASPECTOS GERAIS DA METODOLOGIA EMPREGADA	35
<b>4</b>	<b>INFLUÊNCIA DE DESALINHAMENTOS LATERAIS E ANGULARES EM <i>WPT</i> COM DUAS BOBINAS</b>	<b>37</b>
4.1	ESTUDOS PRELIMINARES	37
4.1.1	Estudo da Máxima Transferência de Potência em Sistemas de <i>WPT</i>	37
4.1.1.1	Influência de Desalinhamentos Laterais e Angulares	44
4.1.2	Comportamento da Corrente no Primário	48
4.2	ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA CORRENTE NO PRIMÁRIO	51
4.2.1	Validações Experimentais	51
4.2.2	Desalinhamento Lateral e Angular	55
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E RESULTADOS DO MÉTODO</b>	<b>59</b>
5.0.3	Método para estimação da posição da bobina implantável	64
5.1	AVALIAÇÃO DA PRECISÃO E EXATIDÃO DO MÉTODO PROPOSTO	65
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>71</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS	72
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>74</b>
	<b>Apêndice A – CIRCUITO PARA AQUISIÇÃO DOS PONTOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e estudo de dispositivos médicos implantáveis (*IMDs*) têm crescido substancialmente nas últimas décadas. Em pesquisa realizada por Sodagar (2014), verificou-se que o número de documentos técnico/científicos sobre dispositivos implantáveis aumentou de aproximadamente 100 documentos na década de 1960 para aproximadamente 7000 documentos na década de 2000. Este crescimento é evidente também se comparado ao número de publicações indexadas na base de dados do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*IEEE*). Na década de 1990 foram registrados 344 documentos que possuem a palavra “*implantable*” como palavra-chave, na década de 2000 este número aumentou expressivamente para aproximadamente 1770 documentos, e no período de 2011-2015 ultrapassou 2070 documentos em apenas 5 anos. Este comportamento reflete, portanto, o interesse da comunidade científica em desenvolver soluções para dispositivos implantáveis. Seguindo este interesse e buscando utilizar a engenharia biomédica como fonte de melhorias na qualidade de vida, o presente trabalho tem como objetivo contribuir no desenvolvimento de *IMDs*.

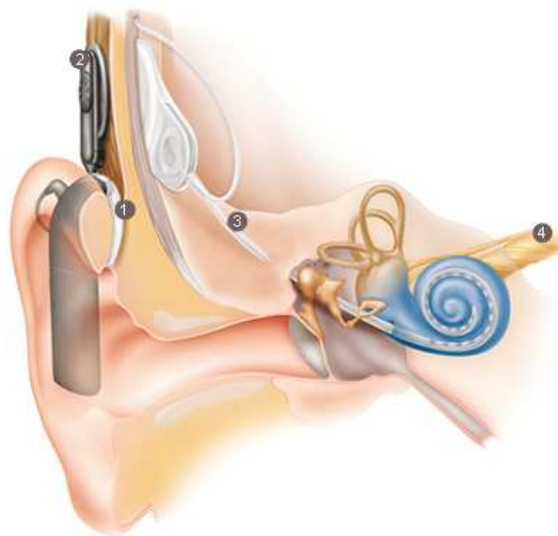
### 1.1 DISPOSITIVOS MÉDICOS IMPLANTÁVEIS E MOTIVAÇÃO

Dispositivos implantáveis são utilizados nas mais diversas áreas da medicina, tanto para proporcionar um auxílio ao diagnóstico de forma eficiente ao monitorar parâmetros e sinais biológicos, quanto para uso terapêutico ao estimular tecidos ou órgãos.

O desenvolvimento de *IMDs* teve início no final da década de 1950, quando Wilson Greatbatch e William M. Chardak desenvolveram o primeiro marcapasso totalmente implantável e realizaram testes em animais. Posteriormente, Greatbatch e seus colaboradores implantaram o dispositivo desenvolvido também em seres humanos. Já no final dos anos 60, Dr. Michel Mirowski desenvolveu um dispositivo implantável capaz de detectar o início de uma fibrilação ventricular e interrompê-la através de um choque elétrico direto no coração (NEBEKER, 2002; GREATBATCH; HOLMES, 1991). Em toda a década de 60 e 70, devido ao constante desenvolvimento da eletrônica, de técnicas para comunicação sem fio, transferência

de energia sem fio e estudos sobre estimulação de nervos e músculos, diversos dispositivos implantáveis foram desenvolvidos e aperfeiçoados (NEBEKER, 2002; GREATBATCH; HOLMES, 1991).

Atualmente há implantes retiniais, estimuladores gástricos, estimuladores neurais, dispositivos que coletam dados da temperatura corporal, da força muscular, da pressão sanguínea e níveis de glicose do paciente (CAMPI et al., 2016; JOUNG, 2013; LIM et al., 2005; BAKER; SARPESHKAR, 2007). A figura 1 apresenta um implante coclear composto por um dispositivo externo (1) que capta as ondas sonoras do ambiente, converte a informação em um sinal digital e o transmite, via acoplamento magnético (2), para o dispositivo implantado. O dispositivo implantado (3) então transmite o estímulo até um *array* de eletrodos localizado na cóclea do paciente que estimulará o nervo auditivo (4) conectado ao sistema nervoso central (ZENG et al., 2008).

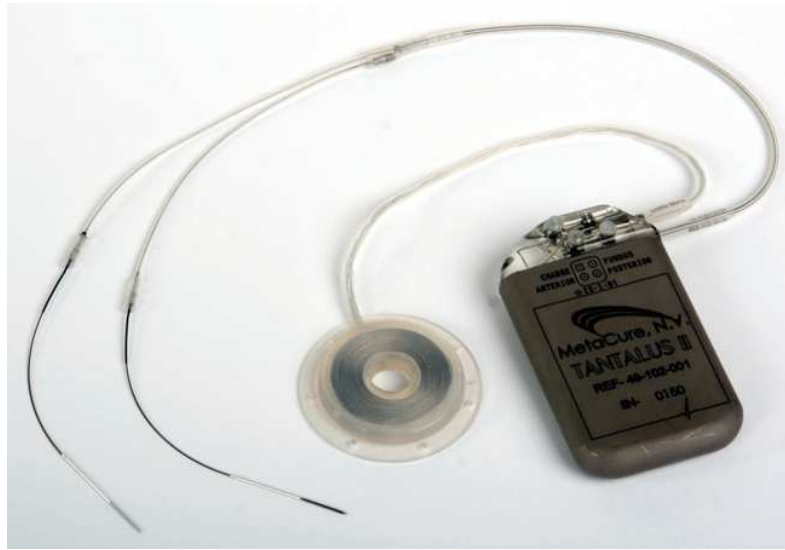


**Figura 1: Exemplo de um implante coclear.**

**Fonte: Adaptado de (ZENG et al., 2008).**

Outro exemplo, mostrado na figura 2, trata de um estimulador gástrico. Este *IMD* proporciona o aumento da atividade dos músculos gástricos apenas quando o paciente come, o que modifica a secreção de hormônios afetando favoravelmente o metabolismo da glicose e gordura (PRUTCHI, 2011). Nota-se, também, a presença de uma bobina ligada ao *IMD* responsável por acoplar magneticamente o dispositivo implantável a um dispositivo externo, possibilitando transmitir dados e/ou energia sem uma conexão por fio entre os dispositivos.

De acordo com a forma que é disponibilizada a energia para o funcionamento do *IMD*, pode-se classificá-los em dispositivos ativos ou passivos. Os *IMDs* ativos (*AIMDs*) são equipa-



**Figura 2: Dispositivo de estimulação gástrica.**

**Fonte: Adaptado de (PRUTCHI, 2011).**

dos com uma fonte de energia elétrica e os *IMDs* passivos são alimentados por meio de uma fonte externa, geralmente via acoplamento magnético.

Apesar da maior eficiência energética dos dispositivos ativos se comparados aos dispositivos passivos, o uso de bateria em um *IMD* requer sua eventual substituição. Para minimizar a necessidade de um novo procedimento cirúrgico e proporcionar uma melhor qualidade de vida ao paciente, diversas pesquisas tem buscado desenvolver dispositivos de baixa potência para maximizar a autonomia dos implantes (HU; SAWAN, 2005; SALAM et al., 2010).

Outra solução amplamente estudada é o uso de técnicas de transferência de energia sem fio (*WPT*) para recarregar a bateria do implante e assim aumentar sua vida útil. Esta técnica, em geral, utiliza-se de um enlace indutivo formado por duas bobinas, cuja primeira, localizada no dispositivo externo, transmite energia para a segunda, implantada no paciente. Com o avanço dos estudos nesta área, verificou-se que parâmetros como frequência de operação do enlace, dimensões, distância e orientação relativa das bobinas influenciam consideravelmente na eficiência de transferência de energia ( $\eta$ ) e na potência relativa entregue ao secundário ( $P_2/P_{2max}$ ) (HUI et al., 2014; ABATTI et al., 2015).

De fato, conhecer a posição da bobina implantável permite alinhar o enlace de forma a obter um maior controle sobre o processo de recarga da bateria de um *IMD*. Todavia, determinar a posição relativa da bobina implantada não é uma tarefa simples. Primeiro porque em geral, o procedimento para implantar o referido dispositivo possui uma precisão limitada quanto ao local e posição em que será inserido. Além disso, com o decorrer do tempo o dispositivo im-



plantado ou a bobina conectada nele pode deslocar-se alterando sua posição inicial. Portanto, o desenvolvimento de métodos para determinar a posição relativa da bobina implantada se mostra interessante, uma vez que ao se obter maior controle da distância e orientação das bobinas, conseqüentemente, pode-se conseguir um melhor gerenciamento do processo de recarga da bateria e, assim, garantir um procedimento mais rápido e seguro.

## 1.2 OBJETIVO DESTE TRABALHO

Este trabalho visa apresentar um método para determinação da posição relativa da bobina implantável de um *IMD*, apenas a partir dos parâmetros elétricos avaliados no primário de um enlace formado por duas bobinas, de forma a viabilizar o desenvolvimento de instrumentos para determinação da posição da bobina implantável sem a necessidade de circuitos adicionais no *IMD*, possibilitando um melhor controle e gerenciamento da transmissão de energia sem fio.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 apresenta uma discussão acerca do estudo e desenvolvimento de sistemas de *WPT* enfatizando os avanços e características que possibilitaram sua aplicação em *IMDs*. Ainda neste capítulo são apresentados trabalhos relacionados a técnicas para estimação da posição relativa da bobina, destacando a importância de métodos para esta finalidade.

Em seguida, no capítulo 3, realiza-se uma análise teórica da indutância mútua em um sistema de *WPT* a duas bobinas, destacando os métodos para o cálculo da indutância mútua e as diversas situações de desalinhamento do enlace indutivo formado por duas bobinas. Também são apresentadas as equações que regem um sistema de *WPT* a duas bobinas, bem como a discussão e desenvolvimento matemático para descrever o comportamento relativo da corrente no primário.

O capítulo 4 apresenta o estudo prático da influência do posicionamento relativo do enlace sobre o acoplamento magnético em um sistema de *WPT* a duas bobinas. Para isso, é realizado um estudo preliminar visando a determinação do comportamento da máxima transferência de potência frente a diferentes situações de desalinhamento, bem como a análise da influência do desalinhamento lateral e angular para diferentes níveis de corrente relativa considerando um enlace indutivo com dimensões críticas.

Determinado o comportamento de um sistema de *WPT* em diferentes situações de desalinhamento, o capítulo 5 apresenta o método proposto para determinação da posição e orientação relativa de uma bobina implantável por meio da corrente no primário. São realizados testes para avaliação das características do procedimento e do grau de precisão/exatidão do método.

Por fim, são apresentadas as considerações finais, discutindo as contribuições do presente trabalho e o desenvolvimento de trabalhos futuros.

## 2 ESTUDO DE SISTEMAS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO E DISPOSITIVOS IMPLANTÁVEIS

Neste capítulo busca-se realizar uma revisão bibliográfica acerca do desenvolvimento e estudo de sistemas de transferência sem fio, bem como o uso desta técnica em dispositivos implantáveis.

### 2.1 SISTEMAS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO

Uma *WPT* pode ser obtida por meio de antenas que transmitem a energia em forma de ondas eletromagnéticas ou pelo acoplamento magnético formado por duas ou mais bobinas próximas o suficiente. O uso de antenas permite transmitir energia a grandes distâncias e é chamada de transmissão de energia irradiada. Já o segundo mecanismo opera na região próxima ao campo magnético gerado pelas bobinas e é chamada de transmissão não irradiada, sendo aplicado a pequenas e médias distâncias (HUI et al., 2014).

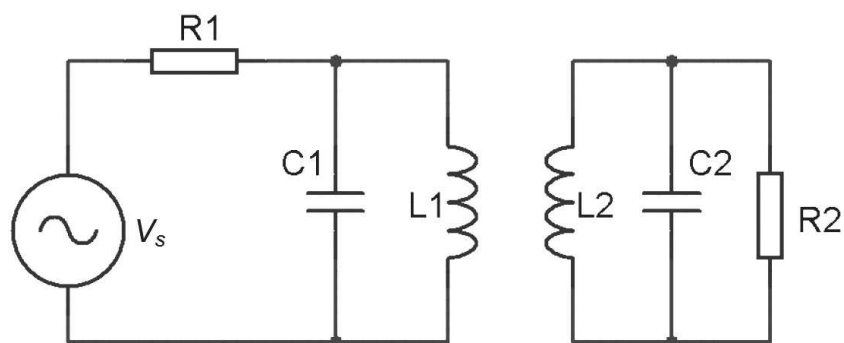
Nicola Tesla foi o pioneiro nesta área, apresentando diversos estudos e formulando alguns princípios então chamados de “princípios de Tesla”. Em particular ele observou que é interessante o uso de sistemas de *WPT* baseado em transmissão não irradiada em conjunto com o uso de técnicas de ressonância no transmissor e receptor, pois estes permitem aumentar a eficiência e o ganho de tensão, uma vez que, a condição de ressonância obtida aplicando um capacitor devidamente projetado, proporciona uma compensação da indutância de dispersão gerada quando duas bobinas estão próximas (HUI et al., 2014).

Ko et al. (1977) foram um dos primeiros a avaliar e definir um procedimento de projeto para um enlace a duas bobinas perfeitamente alinhadas, verificando que parâmetros como frequência de operação do enlace, dimensões e distância influenciam a eficiência na transferência de energia e a potência entregue ao secundário. Já Donaldson e Perkins (1983) avaliaram o uso de enlaces indutivos sintonizados, ou seja, seguindo os princípios de Tesla, adicionaram um capacitor em série à bobina do primário e um capacitor em paralelo a bobina do secundário. O intuito desta configuração foi permitir, simultaneamente, eficiência adequada e

relativa tolerância a desalinhamentos, uma vez que em um enlace cujo primário não está sintonizado, obter ambas características é impossível (DONALDSON; PERKINS, 1983).

Soma et al. (1987) apresentaram uma análise detalhada de um enlace a duas bobinas avaliando situações de desalinhamento lateral, angular e casos genéricos que incluem ambos os desalinhamentos, demonstrando que a posição relativa entre as mesmas é uma das características fundamentais para a implementação de uma *WPT* eficiente. Procedimentos de projeto para maximizar o acoplamento para uma determinada configuração também foram apresentados.

Zierhofer e Hochmair (1996) descreveram técnicas de projeto geométrico de bobinas para obter um acoplamento ótimo entre duas bobinas. A técnica consiste em calcular a autoindutância e indutância mútua de duas bobinas levando em consideração suas dimensões, distância, frequência de operação e perdas devido a capacitâncias parasitas. Utilizando um circuito ressonante duplo, como mostrado na figura 3, foi realizado o comparativo entre dois casos utilizando bobinas planares. No primeiro caso foi definido um raio máximo das bobinas igual a 12 mm e raio mínimo igual a 11,25 mm. Assim, considerando o raio do fio de cobre igual a 0,125 mm, foi possível obter bobinas com quatro espiras, com fator de qualidade próximo de 80, o que resultou em 52% de eficiência. Já no segundo caso, foram reduzidas as dimensões máxima e mínima para 10,3 mm e 6,8 mm, respectivamente, obtendo-se bobinas com seis espiras. Portanto, apesar da redução das dimensões, ao distribuir-se as espiras em toda sua área sem concentrá-las em seu diâmetro externo, aumenta-se o coeficiente de acoplamento mantendo a eficiência energética.



**Figura 3: Diagrama esquemático de um sistema de *WPT* a duas bobinas com dupla ressonância.**

**Fonte: Adaptado de (ZIERHOFER; HOCHMAIR, 1996)**

Nos recentes progressos, boa parte dos trabalhos tem estudado técnicas de projeto e otimização para melhorar o desempenho e características do sistema de *WPT*. Neste sentido, por exemplo, há trabalhos que visam o projeto de um sistema que alcance um coeficiente de

acoplamento crítico a uma determinada distância. Nesta situação a eficiência alcança 50 % e, portanto, obtêm-se uma máxima transferência de energia. Há também trabalhos que abordam o uso de diferentes geometrias e confecções de bobinas, seja o uso de bobinas planares, circulares, quadradas ou multicamadas, como também bobinas com fio de cobre ou confeccionadas em placas de circuito impresso (RAMRAKHYANI et al., 2011; BAKER; SARPESHKAR, 2007; JOW; GHOVANLOO, 2007). Além disso, recentemente, estudos utilizando sistemas de *WPT* a três e quatro bobinas também têm se destacado.

Baker e Sarpeshkar (2007) apresentaram o projeto de um sistema de *WPT*, bem como o desenvolvimento de um circuito integrado ao qual ele é aplicado. Escolhendo adequadamente um valor para carga e uma determinada distância entre as bobinas do primário e secundário foi possível otimizar a eficiência energética do sistema. Os parâmetros do projeto foram calculados considerando um consumo de potência próximo de 10 mW e uma distância de até 10 mm. À máxima distância especificada (10 mm), obteve-se uma eficiência de 51% utilizando duas bobinas multicamadas confeccionadas com fio de Litz, uma com 10 espiras, outra com 15 espiras e ambas com 15 mm de raio.

Jow e Ghovanloo (2007) descrevem o projeto e otimização de uma *WPT* utilizando bobinas de circuito impresso. A técnica proposta considera as resistências e capacitâncias parasitas para definir as dimensões geométricas ótimas. Assim, busca-se otimizar o fator de qualidade das bobinas e, conseqüentemente, um melhor desempenho do sistema. Este tipo de bobina foi utilizada também em Kaini et al. (2011) para descrever uma técnica de otimização para enlaces a duas, três e quatro bobinas.

Hui et al. (2014) realizaram uma revisão crítica sobre o progresso de sistemas de *WPT* a médias distâncias, ao qual, dentre as características de uma *WPT*, foram destacadas a eficiência energética e a condição de máxima transferência de energia. O projeto do enlace pode ter como objetivo otimizar uma destas características, o que implicará diretamente na eficiência e na distância do enlace. Neste sentido, Abatti et al. (2015) apresentam uma derivação das condições de máxima transferência de potência para um sistema de *WPT* a duas e quatro bobinas, discutindo a relação entre a eficiência energética e a razão entre a potência máxima disponível e a potência entregue ao secundário. No caso, avaliar uma *WPT* investigando a potência relativa do sistema é uma melhor abordagem se comparado a avaliações que apenas investigam a potência absoluta entregue ao secundário (ou à carga).

De fato, o projeto de sistemas de *WPT* é complexo, exigindo atenção à diversos fatores que influenciam o desempenho e viabilidade do sistema. Quando aplicado a dispositivos implantáveis, fatores como geometria, dimensões e distância ficam ainda mais limitados, aumentando a complexidade do projeto e a influência de desalinhamentos entre as bobinas que compõem o enlace.

## 2.2 ALGUMAS APLICAÇÕES DE SISTEMAS *WPT* AOS DISPOSITIVOS MÉDICOS IMPLANTÁVEIS

O fornecimento de energia para um dispositivo implantável é umas das grandes barreiras em seu desenvolvimento. A forma mais convencional é o uso de baterias de alta densidade de potência. Neste sentido, objetiva-se o desenvolvimento de baterias cada vez menores e com uma duração ainda maior, por exemplo, baterias de lítio-iodo, lítio-carbono ou fluoreto de lítio que permitem aumentar o tempo necessário para uma nova substituição em um implante (JOUNG, 2013). Alternativamente, o uso de uma *WPT* possibilita energizar um dispositivo implantável totalmente passivo ou recarregar uma bateria implantada.

Recentemente, pesquisadores tem buscado uma terceira forma de fornecer energia ao dispositivo utilizando-se do próprio organismo do paciente, transformando fenômenos químicos, físicos ou mecânicos do corpo humano em energia elétrica. Esta tecnologia tem sido chamada de “*energy harvesting*” ou “*energy scavenging*” (MITCHESON, 2010). No entanto, os métodos para geração de energia por meio do próprio organismo tem produzido níveis muito reduzidos de energia e baixa eficiência, o que ainda limita seu uso em dispositivos implantáveis (JOUNG, 2013).

Vale ressaltar que com o avanço dos *IMDs* e a inclusão de funcionalidades mais complexas, como comunicação sem fio e processamento de sinais coletados no próprio dispositivo, tem aumentado a demanda de energia necessária para o funcionamento do dispositivo. Mesmo com o desenvolvimento de tecnologias de baixa potência, em geral, o projeto de dispositivos médicos passivos fica limitado a aplicações que exigem um funcionamento não contínuo. Já para dispositivos cuja demanda é razoavelmente maior e que exige um tempo de operação contínuo, normalmente utilizam-se técnicas de *WPT* aliadas ao uso de baterias recarregáveis de alta capacidade para reduzir a necessidade de novos procedimentos cirúrgicos para substituição da fonte de energia.

Jeutter (1982) foi um dos pioneiros ao apresentar o uso de um sistema *WPT* a duas bobinas como solução para recarregar a bateria de um dispositivo implantável. O sistema foi projetado para recarregar uma bateria de níquel-cádmio (NiCd), com capacidade de 100 mAh,

implantada 13 mm abaixo da pele usando duas bobinas com diâmetro de 50 mm. Os experimentos foram realizados *in vivo* implantando o dispositivo na região abdominal de um cão Labrador de 16 kg. O sistema de *WPT* projetado foi capaz de fornecer 80 mA, porém, a apenas 6 % de eficiência energética. Já ao fornecer 40 mA, a eficiência do sistema aumentou para 12 % a uma distância de 13 mm, possibilitando um procedimento de recarga com duração de 2,5 horas.

A partir de então, diversos trabalhos seguiram esta linha de pesquisa. Lim et al. (2005) utilizaram um acoplamento magnético formado por duas bobinas para transmitir energia e carregar a bateria de um dispositivo auditivo no ouvido médio totalmente implantável (*F-IMEHD*). Um *F-IMEHD* capta as ondas sonoras com um microfone próximo do canal auditivo, processa a informação no dispositivo localizado entre o mastoide e o ouvido e realiza estímulos vibratórios na região do ouvido médio por meio de um transdutor. Para o desenvolvimento do carregador transcutâneo foi inserido no *IMD* uma bobina próxima ao dispositivo que foi conectada a um circuito responsável por recarregar a bateria também presente no encapsulamento implantado. O estudo realizado ainda utilizou a mudança de impedância no secundário para enviar informações pertinentes através do mesmo enlace indutivo, projetado para uma frequência de 152 kHz.

Artan et al. (2010) avaliaram o uso de um carregador de bateria aplicado a um *AIMD* utilizando um enlace indutivo projetado para uma frequência de operação de 1 MHz. Mesmo sem otimizar o circuito implementado ou o enlace indutivo, foi observado que a solução proposta possibilita carregar uma bateria de 100 mAh em 2 horas e 17 minutos a uma distância de 2 cm. Para obter este desempenho, foram realizadas alterações na distância entre as bobinas e inseridos desalinhamentos laterais para então comparar as diferentes situações com a mudança de temperatura e tempo de recarga. Para 1 cm de distância entre as bobinas (perfeitamente alinhadas) o tempo de recarga foi de 115 minutos com uma mudança de temperatura no secundário de 1,7 °C. Quando foi inserido um desalinhamento lateral deslocando a bobina 2 cm uma da outra, houve uma alteração no tempo de recarga para 130 minutos e a diferença de temperatura aumentou para 2 °C. De fato, ao utilizar um sistema de *WPT* todos estes parâmetros estão relacionados com a eficiência na transmissão. Uma vez que a distância entre as bobinas é alterada, ou insere-se um desalinhamento, a eficiência na transmissão não será a mesma e o tempo de recarga mudará.

Campi et al. (2016) realizaram diferentes ensaios e simulações buscando identificar uma boa solução levando em consideração as especificações de bobinas planares, a topologia da compensação capacitiva, a frequência de operação e ainda possíveis influências do desalinhamento angular e lateral. Ao comparar o sistema de *WPT* projetado a 300 kHz e a 13,56 MHz observou-se que o uso de uma frequência mais alta ocasionou um enlace utilizando bobinas

com um número reduzido de voltas e melhor eficiência. Esta característica deve-se à melhora do fator de qualidade das bobinas. Campi et al. (2016) ainda realizaram testes considerando diferentes meios cujo enlace a duas bobinas seria aplicado, observando que a presença de um material metálico (no caso o titânio do encapsulamento do *IMD*) influencia negativamente a eficiência do sistema de *WPT* e que o uso de uma camada de material ferromagnético entre a bobina e o material permite compensar sua influência. Vale ressaltar que os testes foram realizados considerando uma camada de pele e gordura com 5 mm de espessura.

Quanto ao desalinhamento estudado, foram realizados testes fixando as bobinas a uma distância de 10 mm e alterado o ângulo relativo entre elas de 0° a 30°. Posteriormente, com as bobinas alinhadas com ângulo igual a 0° deslocou-se uma das bobinas lateralmente de 0 a 20 mm. Verificou-se que, nas condições do experimento, a eficiência sofre maior influência do desalinhamento lateral. Para as variações de ângulo estudadas, a redução da eficiência foi mínima.

Rao et al. (2014) desenvolveram um dispositivo de estimulação gástrica miniaturizado visando reduzir a necessidade de eventuais procedimentos cirúrgicos para substituição de sua bateria. O *IMD* foi desenvolvido para ser implantado endoscopicamente e foram testadas duas soluções para fornecer energia ao implante, uma passiva e outra ativa, ambas utilizando *WPT*. Foram também realizados experimentos *in vivo*, usando a parede abdominal do animal (porco) de aproximadamente 3 cm. Verificou-se que o uso de uma bobina transmissora reduzida aumenta a sensibilidade do dispositivo a desalinhamentos dificultando a realização das análises práticas, uma vez que o implante não é visível ao paciente e ao médico (RAO et al., 2014).

A aplicação de um sistema de *WPT* em *IMDs* adiciona diversos fatores que devem ser minuciosamente considerados. Os trabalhos discutidos anteriormente evidenciam a necessidade de: (1) avaliar a profundidade na qual o dispositivo será implantado para definição da distância mínima entre as bobinas, (2) investigar a região na qual o dispositivo será implantado e as limitações dimensionais das bobinas, (3) reduzir o consumo de energia necessário para carregar a bateria no menor tempo possível e (4) dimensionar a influência do desalinhamento lateral e angular sobre a *WPT* (que em situações práticas podem inviabilizar uma *WPT* adequada). Além disso, há também trabalhos que discutem as limitações de energia em forma de campo magnético que podem ser aplicadas no tecido biológico, bem como a preocupação que se deve ter em reduzir possíveis aumentos de temperatura devido a perdas por efeito joule na bobina e no próprio circuito do *IMD*.

Portanto, constata-se a necessidade de um relativo controle sobre as características de eficiência e potência transmitida no sistema de *WPT*. Por isso, conhecer a localização da bobina,



e muitas vezes do implante, possibilita aproximar o processo de *WPT* a uma entrega ótima de potência ao *IMD*, e assim, um procedimento de transferência de energia e recarga mais rápido e seguro.

### 2.3 TÉCNICAS PARA ESTIMAÇÃO DA POSIÇÃO DE UMA BOBINA OU DISPOSITIVO IMPLANTADO

Estimar a posição e orientação de uma bobina implantada e conseqüentemente do dispositivo implantado (se a bobina estiver inserida no encapsulamento) no corpo humano é de grande importância. Conhecer a posição e orientação do *IMD* pode auxiliar na obtenção de um melhor diagnóstico, na execução de um procedimento cirúrgico na região que há um implante e na maior controle do sistema de transferência de energia/informação sem fio. No entanto, determinar a posição relativa de uma bobina ou dispositivo sem utilizar equipamentos de imagem médicos convencionais, como tomografia, ultrassonografia, e ressonância magnética, ou sem procedimentos invasivos, não é uma tarefa simples.

Nem sempre o processo de implantação de um dispositivo é preciso e exato. Em muitas aplicações o dispositivo é implantado em alguma cavidade do corpo com um certo grau de movimentação. Em outros casos, a bobina do sistema de *WPT* do *IMD* não é inserida junto ao seu encapsulamento visando posicioná-la em uma região mais propícia à *WPT*, ou seja, em regiões cuja camada de tecido seja menos espessa. Tal procedimento pode resultar em um maior grau de mobilidade da bobina se suas dimensões forem reduzidas em comparação ao encapsulamento, ou se a cavidade na qual a bobina foi implantada possuir um espaço relativamente grande que permita deslocamentos laterais da bobina ou mudanças em sua orientação.

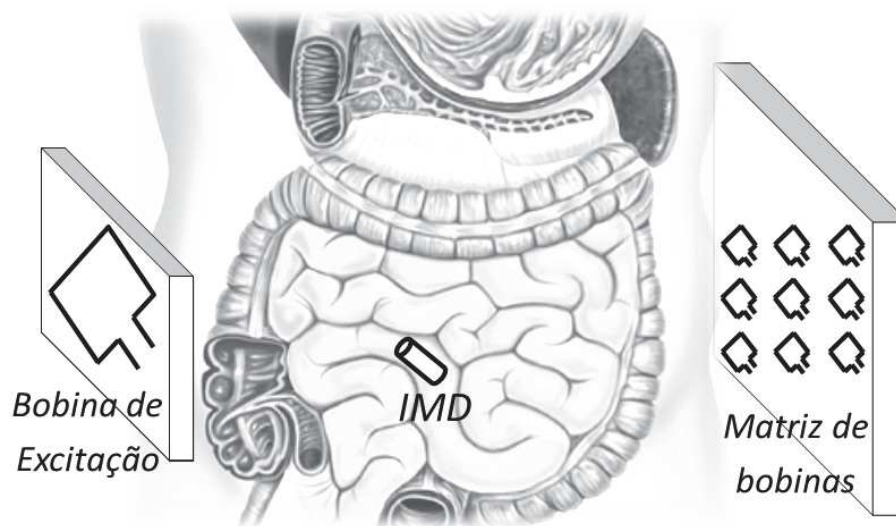
Na literatura, há diferentes abordagens para estimar a posição de um dispositivo implantável ou de uma bobina implantada, uma vez que há *IMDs* de diversos tamanhos, funcionalidades, limitações e principalmente regiões em que são implantados. Em geral, os *IMDs* possuem algum sistema de comunicação, seja por radio-frequência ou por acoplamento magnético, e como discutido em todo este capítulo, cresce o número de *IMDs* que utilizam um acoplamento magnético para alimentar um dispositivo passivo ou recarregar a bateria de um *AIMD*.

Há trabalhos que tem buscado desenvolver um método para estimar o posicionamento da bobina aplicando técnicas de rastreamento de objetos já utilizadas em outras aplicações não biomédicas. Exemplo disso é o trabalho desenvolvido por Kazumoto et al. (2012), que utiliza o processamento de sinais provenientes de um radar de penetração no solo (*GPR*). O método de *GPR* permite identificar objetos enviando e recebendo ondas eletromagnéticas que aliado a técnicas de cancelamento por interferência e sinais de largura ultra larga, podem identificar

*IMDs* tanto próximos à superfície quanto em regiões mais profundas do corpo humano.

A técnica amplamente utilizada na estimação da posição relativa de dispositivos de radiofrequência (RF), como etiquetas de identificação (*RFID*), também tem sido aplicada na localização de *IMDs*. Nesta técnica, o *IMD* transmite um sinal de RF e os sensores, na superfície do corpo, capturam o sinal transmitido, o processam e estimam a localização do dispositivo implantado. Isto pode ser feito avaliando o tempo, a fase, ou a amplitude do sinal capturado em cada sensor (POURHOMAYOUN et al., 2012; KHAN et al., 2011).

Utilizando outra abordagem, há pesquisadores que desenvolveram métodos recentes para aplicações específicas, utilizando o próprio circuito LC presente no *IMD*. Neste sentido, uma das primeiras abordagens é descrita por Hashi et al. (2011), que desenvolveram um sistema para detecção da posição de uma cápsula endoscópica. O sistema consiste de uma bobina quadrada de 390x390 mm, responsável por excitar a bobina do dispositivo implantável, posicionada em um dos lados da região cujo dispositivo pode estar. Já no outro lado da região, é posicionado uma matriz de bobinas menores que mapeia o fluxo magnético da região e a influência do *IMD*. Uma ilustração desta solução é apresentada na figura 4. Desta forma, o sistema utiliza a densidade de fluxo magnético, com e sem o dispositivo, para estimar a posição e orientação do mesmo, permitindo mapear toda a movimentação do dispositivo na região avaliada.



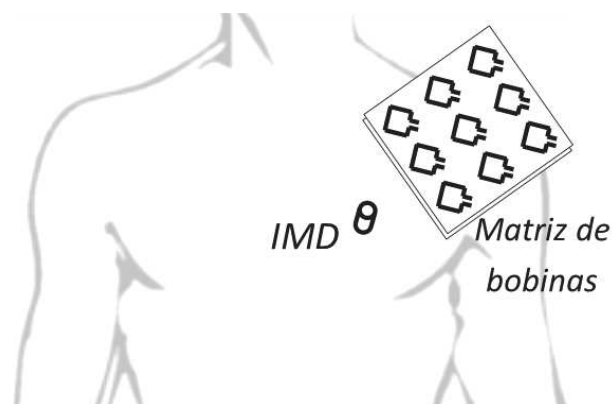
**Figura 4:** Ilustração de um sistema para determinação da posição de uma cápsula endoscópica.

Fonte: Adaptado de (HASHI et al., 2011)

De forma similar e também visando aplicação a cápsulas endoscópicas sem fio, Guo et al. (2013) realizaram um estudo para otimizar a geometria e dimensões da bobina responsável pela excitação do dispositivo. O método utilizado para estimar a posição e orientação

também usa a sobreposição da densidade de fluxo magnético detectado por uma matriz de bobinas, porém, o mesmo utiliza a otimização por enxame de partículas (*PSO*) para realização dos cálculos.

Zou e O’Driscoll (2015) apresentam diferentes abordagens para estimar a posição de um dispositivo implantável baseado na indutância mútua formada por um enlace a duas bobinas, uma no *IMD* e outra no dispositivo externo. De forma geral, a técnica apresentada difere da anterior, uma vez que não se utiliza de uma bobina destinada a gerar o campo magnético e, se comparado a um sistema de *WPT* convencional, os autores substituíram a bobina do primário por uma matriz de bobinas (figura 5) para avaliar a diferença entre a indutância mútua calculada e medida. São descritas duas soluções para medição da indutância mútua, uma utilizando apenas as informações do primário e outra por meio de um circuito adicional no *IMD* para enviar ao dispositivo externo a tensão sobre a carga no secundário. Obtida a indutância mútua prática, compara-se com a indutância mútua calculada para os parâmetros do enlace indutivo e estima-se a localização da bobina. Verifica-se, portanto, que para aplicar o método proposto, deve-se ter conhecimento das características físicas do enlace, tais como resistência de carga, indutância e resistências intrínsecas da bobina.



**Figura 5: Ilustração de um sistema para determinação da posição de uma bobina implantada por meio de uma matriz de bobinas.**

**Fonte: Adaptado de (ZOU; O’DRISCOLL, 2015)**

De modo geral, nota-se que os métodos apresentados até então utilizam, em sua maioria, circuitos adicionais ao *IMD* e/ou algoritmos complexos para estimação da posição da bobina. O uso de uma matriz de pequenas bobinas também é prática comum, disponibilizando uma maior resolução ao método. Desta forma, faz-se interessante o estudo de novas abordagens para estimação da posição e orientação da bobina implantável, principalmente visando a não inserção de circuitos adicionais e independência de um conhecimento prévio das características do enlace indutivo.

### 3 ANÁLISE TEÓRICA DA INDUTÂNCIA MÚTUA E SISTEMAS WPT COM DUAS BOBINAS

No presente capítulo, conceitos e métodos para o projeto de um sistema de transferência sem fio são apresentados, assim como métodos para o cálculo teórico da indutância mútua formada por duas bobinas com diferentes desalinhamentos, bem como técnicas para sua medida prática. Também são apresentadas as equações que regem um sistema de WPT e o desenvolvimento matemático que permite descrever o comportamento da corrente no primário do sistema.

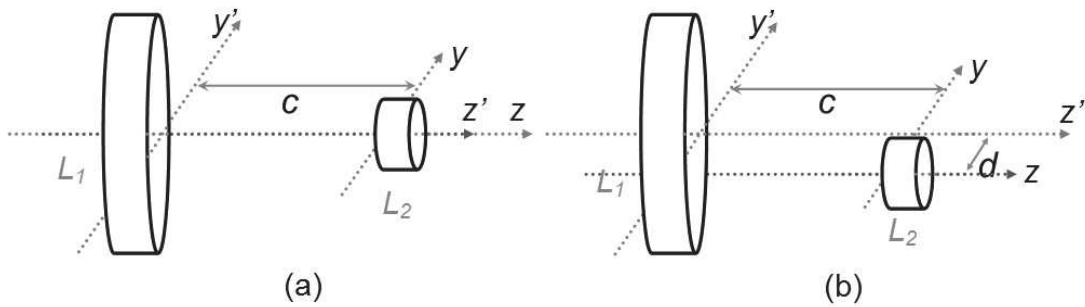
#### 3.1 COEFICIENTE DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO E INDUTÂNCIA MÚTUA

##### 3.1.1 SITUAÇÕES DE DESALINHAMENTO E CÁLCULO DA INDUTÂNCIA MÚTUA

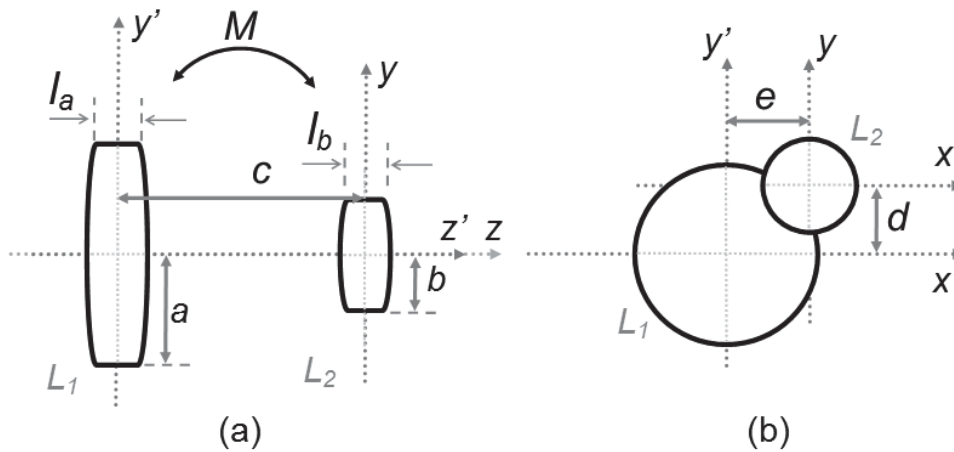
No estudo de um enlace indutivo formado por duas bobinas, diversas situações de posicionamento podem ser consideradas. Em aplicações práticas obter um alinhamento perfeito como o mostrado na figura 6(a), na qual bobinas estão coaxiais e sem qualquer variação de ângulo, é improvável. Desalinhamentos são frequentes, podendo ser classificados em dois tipos: o primeiro causado por um deslocamento lateral de uma das bobinas, seja horizontalmente ou verticalmente (figura 7) e o segundo angular que é gerado pela alteração na orientação relativa das mesmas (figura 8).

Nas representações do posicionamento das bobinas neste trabalho,  $L_1$  corresponde à bobina externa e  $L_2$  à bobina implantável. Os eixos da bobina implantada são representados como  $x$ ,  $y$  e  $z$ , já para a bobina externa  $x'$ ,  $y'$  e  $z'$ . No caso de uma situação de perfeito alinhamento como mostrada nas figuras 6(a) e 7(a), verifica-se que o eixo  $z'$  e  $z$  coincidem, *i.e.*, as bobinas são coaxiais e estão posicionadas a uma distância  $c$  uma da outra. A figura 6(b) representa uma situação de desalinhamento lateral, na qual a bobina  $L_2$  esta deslocada horizontalmente em relação a  $L_1$  a uma distância  $d$ . Na figura 7(b) é apresentada a vista frontal de duas bobinas com desalinhamento lateral, desta vez, há deslocamentos relativos nos eixos  $x$  e  $y$ . A figura 8 apresenta uma situação de desalinhamento angular. A mudança relativa de orientação

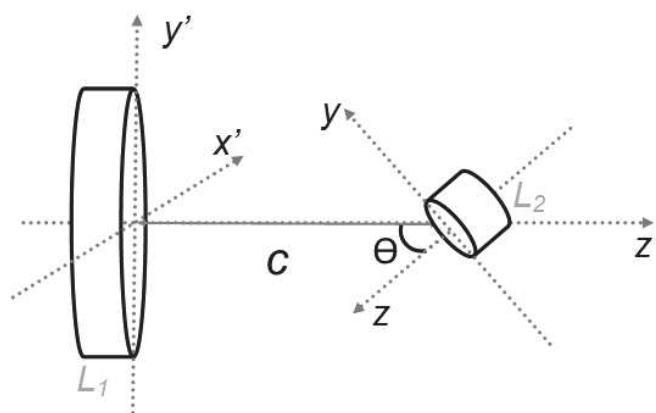
da bobina é representada pelo ângulo  $\theta$  que nada mais é que o arco formado pelos eixos  $z'$  e  $z$ . Somando todas as contribuições de desalinhamento, há a situação genérica ilustrada na figura 9.



**Figura 6:** Disposição de um enlace indutivo para duas bobinas (a) alinhadas e (b) desalinhadas lateralmente. Bobina  $L_1$  corresponde à bobina externa e  $L_2$  à bobina implantada.

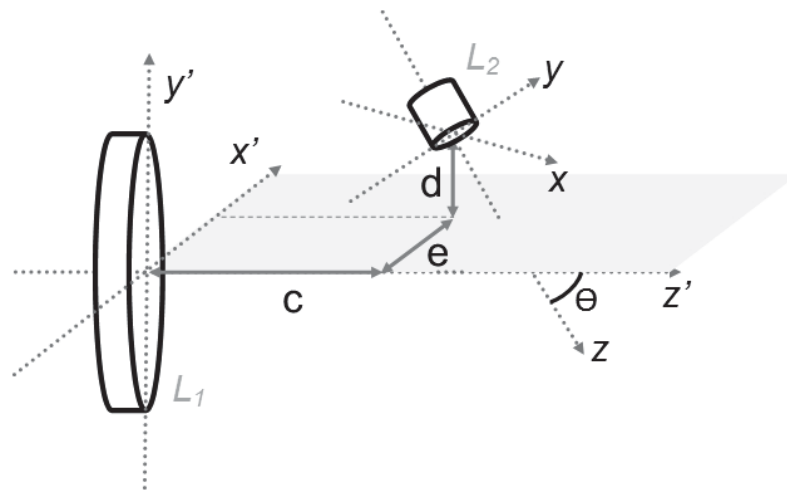


**Figura 7:** (a) Vista lateral de duas bobinas alinhadas e (b) vista frontal de duas bobinas desalinhadas lateralmente.



**Figura 8:** Disposição de um enlace indutivo para uma situação de desalinhamento angular.

Na literatura, diversos métodos para o cálculo da indutância mútua ( $M$ ) entre duas bobinas foram apresentados, sendo abordadas situações de perfeito alinhamento (figura 6(a)),



**Figura 9: Disposição de um enlace indutivo para uma situação geral considerando desalinhamentos laterais e angulares**

desalinhamento lateral (figuras 6(b) e 7(b)), desalinhamento angular e situações mais gerais que consideram os dois tipos de desalinhamentos (figura 9). Em Soma et al. (1987) foi apresentada uma análise, baseada no cálculo da indutância mútua por meio da fórmula de Neumann, do desalinhamento lateral e angular considerando bobinas de apenas uma volta e em seguida foi inserido um fator de correção para bobinas com múltiplas voltas.

Em Babic e Akyel (2008) foi apresentada uma formulação, também baseada na fórmula de Neumann, para o cálculo da  $M$  de duas bobinas com desalinhamento lateral e angular. Em síntese trata-se da aplicação do vetor potencial magnético e da lei de indução de Faraday, gerando uma solução analítica para a indutância mútua. A solução geral desta equação só pode ser obtida de forma numérica. Porém, para casos particulares é possível se obter uma solução analítica. Por exemplo, caso as bobinas estejam em planos paralelos e alinhadas (coaxiais) a solução se mostra bastante simples (ZIERHOFER; HOCHMAIR, 1996). Para os cálculos teóricos foram implementadas no presente trabalho as equações de Babic e Akyel (2008) no *software* Matlab.

### 3.1.2 COEFICIENTE DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO

O coeficiente de acoplamento magnético  $k$  entre as duas bobinas indica quantitativamente o quanto de fluxo magnético gerado por uma bobina está passando pela segunda acoplando-as magneticamente. Este coeficiente pode ser definido pela relação entre a indutância mútua e suas respectivas autoindutâncias:

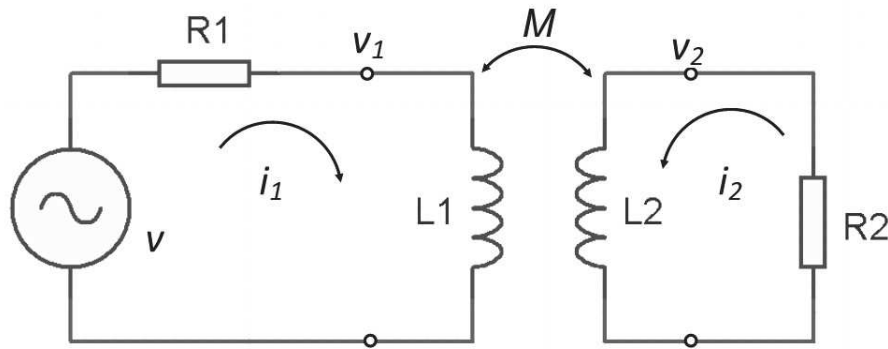
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (1)$$

A figura 10 apresenta o circuito equivalente de duas bobinas acopladas magneticamente. A bobina  $L_1$  é conectada a uma fonte de tensão senoidal  $v$  que fornece potência à carga  $R_2$ . Avaliando as duas malhas deste circuito obtém-se as seguintes expressões:

$$v = (R_1 + j\omega L_1)i_1 \pm j\omega_0 M i_2, \quad (2)$$

e

$$0 = \pm j\omega_0 M i_1 + (R_2 + j\omega L_2)i_2. \quad (3)$$



**Figura 10: Circuito equivalente de duas bobinas acopladas magneticamente.**

A tensão aplicada em  $L_1$  ( $v_1$ ) gera uma variação de fluxo magnético que ao acoplar magneticamente a  $L_2$  induz uma tensão  $v_2$  sobre a carga. No caso,  $v_1$  e  $v_2$  podem ser expressos como:

$$v_1 = j\omega_0 L_1 i_1 \pm j\omega_0 M i_2, \quad (4)$$

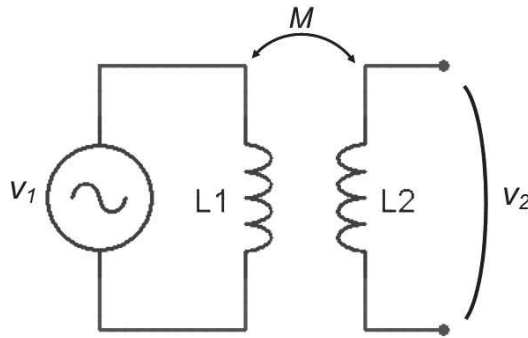
e

$$v_2 = \pm j\omega_0 M i_1 + j\omega_0 L_2 i_2. \quad (5)$$

Com o intuito de mensurar o  $k$  na prática, observa-se que se  $R_2$  tender ao infinito a corrente que circula no secundário tenderá a zero, o que simplifica as expressões (4) e (5). Neste sentido, a figura 11 apresenta o diagrama do esquema para verificar o comportamento prático do coeficiente de acoplamento. Para isso, aplica-se uma tensão senoidal no primário, mede-se a tensão  $v_1$  sobre  $L_1$  e a tensão  $v_2$  nos terminais abertos da bobina  $L_2$  para um  $c$  específico (ver figuras 6(a) e 7(a)). Uma vez que a corrente no secundário é zero,  $v_1 = j\omega_0 L_1 i_1$

e  $v_2 = j\omega_0 M i_1$  (ABATTI et al., 2015; PICHORIM; ABATTI, 2004). Fazendo-se a razão entre as tensões  $v_1$  e  $v_2$  e isolando  $k$  obtém-se a expressão:

$$k = \frac{v_2}{v_1} \frac{L_1}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (6)$$



**Figura 11: Diagrama do esquema para obtenção da curva prática do coeficiente de acoplamento.**

Observa-se que, na prática, a tensão aplicada deve possuir uma frequência suficientemente baixa para minimizar a influência de capacitâncias parasitas da bobina, porém, sem reduzir drasticamente a amplitude da tensão induzida no secundário.

### 3.2 SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO

O sistema de *WPT* estudado e implementado neste trabalho é apresentado na figura 12, no qual utiliza-se compensação capacitiva série no primário e secundário. Com o auxílio das informações do enlace indutivo, como autoindutância das bobinas e a indutância mútua entre elas, é possível avaliar o comportamento teórico do sistema de *WPT* para diferentes especificações de carga, frequência de operação e resistência da fonte. O uso de um modelamento matemático do sistema possibilita, além de corroborar os resultados experimentais, auxiliar o projeto antes da realização dos experimentos, principalmente se determinadas condições são desejadas, otimizando-as antes de qualquer implementação prática.

Como mostrado na figura 12, no presente caso o sistema é composto por duas bobinas  $L_1$  e  $L_2$  em ressonância com os capacitores  $C_1$  e  $C_2$ , respectivamente.  $R_1$  é a soma das perdas dos componentes do primário e da resistência de saída da fonte de potência, e  $R_2$  a soma das perdas dos componentes no secundário e a carga  $R_L$  em série ao circuito ressonante. O modelo matemático que descreve o comportamento deste circuito pode ser escrito como:



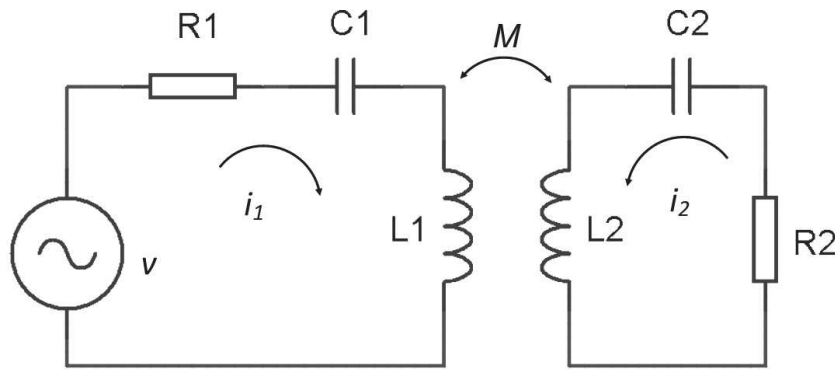


Figura 12: Diagrama esquemático de um sistema de transferência sem fio.

$$v = [R_1 + j(\omega_0 L_1 + \frac{1}{\omega_0 C_1})]i_1 \pm j\omega_0 M i_2, \quad (7)$$

e

$$0 = \pm j\omega_0 M i_1 + [R_2 + j(\omega_0 L_2 + \frac{1}{\omega_0 C_2})]i_2. \quad (8)$$

Considerando que o primário e secundário foram projetados para mesma frequência de ressonância, i.e.,  $\omega_0 = (\frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}})$ , as equações (7) e (8) são simplificadas obtendo-se:

$$v = R_1 i_1 \pm j\omega_0 M i_2 \quad (9)$$

e

$$0 = \pm j\omega_0 M i_1 + R_2 i_2. \quad (10)$$

Resolvendo o sistema formado pelas expressões (9) e (10), obtém-se a corrente no primário:

$$i_1 = \frac{v}{R_1 + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_2}}. \quad (11)$$

A potência elétrica dissipada no primário ( $P_1$ ) é calculada multiplicando a resistência  $R_1$  pelo módulo da corrente  $i_1$  ao quadrado, resultando em:

$$P_1 = \frac{R_1 R_2^2 v^2}{(R_1 R_2 + \omega_0^2 M^2)^2}. \quad (12)$$

Analogamente, a potência dissipada no secundário é dada por:

$$P_2 = \frac{R_2 \omega_0^2 M^2 v^2}{(R_1 R_2 + \omega_0^2 M^2)^2}. \quad (13)$$

Derivando a equação (13) em relação a  $M$  e igualando o resultado a zero, obtém-se a condição para que haja *MPT* (ABATTI et al., 2015):

$$\omega_0^2 M^2 = R_1 R_2. \quad (14)$$

Avaliando as perdas no primário e secundário pode-se determinar que na condição de máxima transferência de potência (*MPT*)  $P_1 = P_{2max} = \frac{v^2}{4R_1}$  e, portanto, pode-se deduzir a relação entre a potência transmitida  $P_2$  pela máxima potência possível  $P_{2max}$  fornecendo a  $P_2/P_{2max}$  do sistema:

$$\frac{P_2}{P_{2max}} = \frac{4R_1 R_2 \omega_0^2 M^2}{(R_1 R_2 + \omega_0^2 M^2)^2}. \quad (15)$$

Dividindo a potência transferida para  $R_2$  ( $P_2$ ) pela potência total ( $P_1 + P_2$ ),  $\eta$  pode ser calculada por:

$$\eta = \frac{\omega_0^2 M^2}{R_1 R_2 + \omega_0^2 M^2}. \quad (16)$$

Seguindo o que a teoria clássica sobre máxima transferência ensina, a *MPT* ocorrerá exatamente quando a eficiência for igual a 50% (ABATTI et al., 2015).

Neste ponto é importante citar a diferença conceitual entre eficiência energética (ou eficiência na transmissão de energia do sistema)  $\eta_E$  e eficiência na transmissão  $\eta_T$ . A primeira considera as perdas da fonte de potência obtendo a razão entre a potência no secundário sobre a potência fornecida pela fonte. Entretanto, a eficiência na transmissão considera apenas a razão da potência transmitida pelo primário para a carga, desconsiderando as perdas na fonte de potência. Portanto, alta eficiência na transmissão não significa uma alta eficiência energética do sistema (HUI et al., 2014). Nas análises deste trabalho são consideradas as perdas na fonte de potência, portanto,  $\eta$  corresponde à eficiência energética do sistema.

### 3.2.1 CORRENTE RELATIVA NO PRIMÁRIO

Além da eficiência na transmissão de energia e a potência relativa, um sistema de *WPT* também pode ser avaliado por meio da corrente no primário. Para isso, foram realizadas algumas manipulações matemáticas que resultam em uma expressão para corrente relativa no primário. Avaliando a corrente no primário expressa em (11) para  $k = 0$ , *i.e.*, quando não há acoplamento entre as bobinas, a  $M$  é nula e a corrente no primário é máxima, sendo expressa como:

$$i_{1max} = \frac{v}{R_1}. \quad (17)$$

Dividindo (11) por (17) obtém-se a expressão da corrente relativa do primário ( $i_1/i_{1max}$ ) dada por:

$$\frac{i_1}{i_{1max}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 R_2 + \omega_0^2 M^2}. \quad (18)$$

Esta expressão indica que para  $k = 0$  obtém-se  $i_1/i_{1max} = 1$ , já para a condição de *MPT* a corrente relativa é igual a 50% da corrente máxima do primário. Substituindo (16) em (18) obtém-se uma relação entre a  $i_1/i_{1max}$  e  $\eta$ :

$$\frac{i_1}{i_{1max}} = \frac{R_1 R_2}{\omega_0^2 M^2} \eta. \quad (19)$$

Ao avaliar  $P_2/P_{2max}$ ,  $i_1/i_{1max}$  e  $\eta$  em conjunto é possível observar três situações específicas de acordo com os pontos de intersecção das mesmas:

Igualando (15) e (16) quando  $P_2/P_{2max} = \eta$  obtém-se:

$$\omega_0^2 M^2 = 3R_1 R_2. \quad (20)$$

Substituindo (20) em (16) e (20) em (18) verifica-se que  $P_2/P_{2max} = \eta = 3/4$  e  $i_1/i_{1max} = 1/4$ .

Igualando (15) e (18) quando  $P_2/P_{2max} = i_1/i_{1max}$  obtém-se:

$$R_1 R_2 = 3\omega_0^2 M^2. \quad (21)$$

Substituindo (21) em (15) e (21) em (16) verifica-se que  $P_2/P_{2max} = i_1/i_{1max} = 3/4$ , e  $\eta = 1/4$ .

Igualando (16) e (18) quando  $\eta = i_1/i_{1max}$  obtém-se:

$$R_1 R_2 = \omega_0^2 M^2. \quad (22)$$

Substituindo (22) em (15) e (22) em (16) verifica-se que  $\eta = i_1/i_{1max} = 1/2$ , e  $P_2/P_{2max} = 1$ . Esta situação corresponde exatamente ao que a teoria da *MPT* afirma.

Os pontos de intersecção formados pelas curvas de  $\eta$ ,  $P_2/P_{2max}$  e  $i_1/i_{1max}$  são características interessantes do comportamento de um sistema de *WPT*, porém, outras situações também devem ser estudadas. A  $i_1/i_{1max}$  possibilita quantificar se há um acoplamento magnético e o nível deste acoplamento. Relacionando o nível de corrente no secundário e o posicionamento das bobinas é possível avaliar a presença de possíveis desalinhamentos laterais e/ou angulares apenas mensurando a corrente no primário.

### 3.3 ASPECTOS GERAIS DA METODOLOGIA EMPREGADA

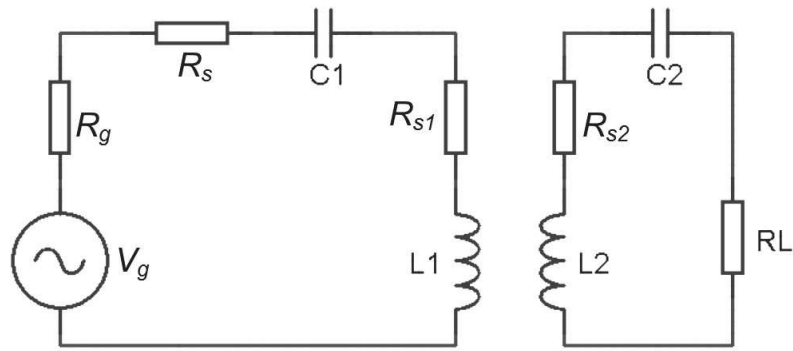
Para a aquisição dos resultados teóricos e práticos (que serão apresentados e discutidos no próximo capítulo) os experimentos seguem uma metodologia em comum. Os resultados teóricos são obtidos por meio da implementação (no software *Matlab*) do modelo matemático do sistema *WPT* a duas bobinas e das equações que regem o cálculo do  $k$  descritos anteriormente.

Os resultados práticos são obtidos por meio da construção de bobinas circulares e solenoidais além do projeto e montagem de sistemas de *WPT*. Instrumentos como osciloscópio e analisador de impedância são utilizados para mensurar os parâmetros elétricos do sistema e auxiliar no projeto do mesmo, calculando valores de indutância, capacitância e resistência com precisão adequada.

A figura 13 apresenta o diagrama esquemático do sistema de *WPT* prático no qual são destacadas as perdas de cada componente que integra o sistema. Para permitir a aquisição do nível de corrente no primário insere-se uma resistência de prova  $R_s$  conhecida, uma vez que a corrente prática no primário é dada por:

$$i_1 = \frac{V_{R_s}}{R_s}. \quad (23)$$

Relacionando a corrente no primário com o seu valor máximo (obtido quando não há acoplamento magnético), calcula-se a  $i_1/i_{1max}$  prática do sistema.



**Figura 13: Diagrama esquemático do sistema de WPT estudado.**

Analogamente à corrente no primário, ao mensurar a tensão sobre a carga  $R_L$ , pode-se monitorar o nível de corrente no secundário e assim a potência que o sistema de WPT entrega ao mesmo (desde que se conheça  $R_2$ ). Obtidas as informações de potência do primário e do secundário é possível calcular a  $\eta$  e  $P_2/P_{2max}$  práticas do sistema, uma vez que  $\eta = \frac{P_2}{P_1+P_2}$  e  $P_{2max} = \frac{V_g^2}{4R_1}$ .

Após o projeto do enlace e do dimensionamento do sistema de WPT é importante validar experimentalmente o sistema com o auxílio do modelo matemático, para que, posteriormente, iniciem-se avaliações mais aprofundadas a respeito da influência do posicionamento relativo do enlace sobre o  $k$ . Estas avaliações podem ser realizadas por meio do monitoramento do nível de corrente no primário para diferentes situações de desalinhamento, variando os parâmetros  $c$ ,  $d$ ,  $e$  e  $\theta$ .

Conhecer padrões de comportamento e o grau de influência de desalinhamentos podem auxiliar o desenvolvimento de procedimentos para determinação da posição e orientação relativa da bobina implantável. Desta forma, para testar a funcionalidade e eficiência dos procedimentos, faz-se uso dos resultados práticos e do ambiente Matlab, assim, é possível realizar simulações que facilitam a execução de testes de hipótese e o desenvolvimento do método.

## 4 INFLUÊNCIA DE DESALINHAMENTOS LATERAIS E ANGULARES EM *WPT* COM DUAS BOBINAS

O presente capítulo tem como objetivo apresentar resultados e discussões acerca da influência de desalinhamentos laterais e angulares em sistemas de *WPT* com duas bobinas. Para isto, este capítulo foi dividido em duas etapas principais: (1) estudos preliminares sobre sistemas de *WPT* a duas bobinas visando a observação do comportamento da máxima transferência de potência frente a diferentes situações de desalinhamento e (2) estudos sobre a influência do desalinhamento lateral e angular para diferentes níveis de corrente relativa considerando um enlace indutivo com dimensões “críticas”.

### 4.1 ESTUDOS PRELIMINARES

#### 4.1.1 ESTUDO DA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE *WPT*

Em um primeiro momento, avaliou-se os recursos disponíveis para confecção das bobinas que irão compor o enlace e, em conjunto, por meio de *software Matlab*, implementou-se o modelo matemático apresentado no último capítulo. Esta prática possibilitou um melhor projeto das bobinas e do sistema, como também um método para corroborar os resultados experimentais.

Para viabilizar um estudo preliminar das características de um sistema de *WPT*, priorizou-se projetar um enlace que possibilitasse obter um sistema com alta eficiência e cuja condição de máxima transferência de potência fosse distante o suficiente para aumentar o grau de liberdade nos ensaios a serem realizados. Outra característica previamente definida foi o uso de bobinas circulares de apenas uma camada e com núcleo de ar, o que facilita sua implementação com características mais próximas às especificações requeridas pelo modelo utilizado. Neste sentido, optou-se por construir as bobinas seguindo as especificações apresentadas na Tabela 1.

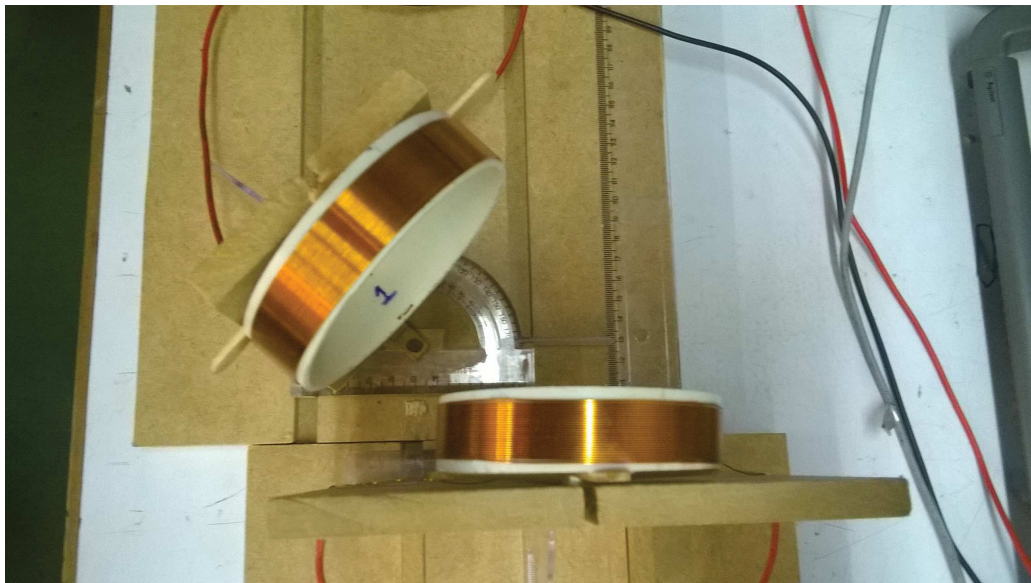
A figura 14 mostra as duas bobinas confeccionadas com o auxílio de um suporte de

**Tabela 1: Especificação das bobinas.**

<b>Especificação</b>	<b>Variável</b>	<b>Valor</b>
Nº de espiras de $L_1$	$N_1$	26
Nº de espiras de $L_2$	$N_2$	26
Raio da bobina $L_1$	$a$	37,5 mm
Raio da bobina $L_2$	$b$	37,5 mm
Largura de $L_1$	$l_a$	13,8 mm
Largura de $L_2$	$l_b$	13,8 mm
Diâmetro do fio de cobre ( $L_1$ )	$d_{wa}$	0,51 mm
Diâmetro do fio de cobre ( $L_2$ )	$d_{wb}$	0,51 mm

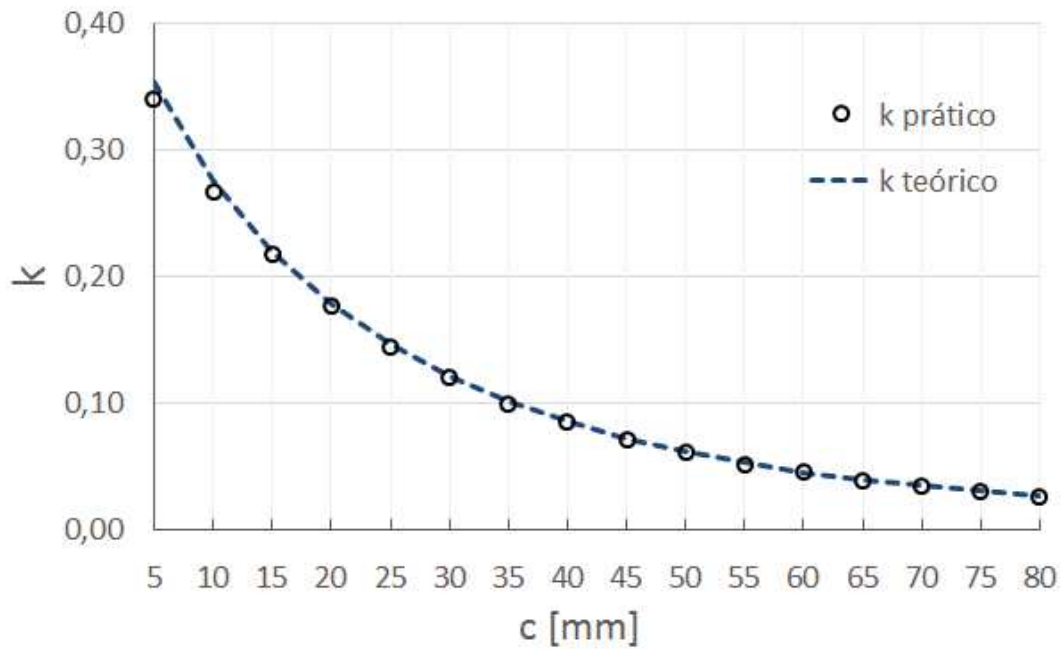
**Fonte: Autoria Própria.**

plástico policloreto de polivinila (PVC) de forma à reduzir possíveis deformações mecânicas no decorrer dos experimentos. As bobinas  $L_1$  e  $L_2$  apresentaram, respectivamente, resistência série interna ( $R_{sL1}$  e  $R_{sL2}$ ) de 2,2  $\Omega$  e 2,15  $\Omega$  e autoindutância de 83,43  $\mu\text{H}$  e 83,34  $\mu\text{H}$ .



**Figura 14: Bobinas  $L_1$  e  $L_2$  confeccionadas seguindo as especificações da Tabela 1.**

O gráfico da figura 15 apresenta o comportamento prático e teórico do  $k$  considerando bobinas coaxiais para diferentes valores de distância  $c$  (ver figuras 6(a) e 7(a)). A curva teórica segue as equações para indutância mútua e autoindutância apresentadas no capítulo 3, enquanto a curva prática foi obtida aplicando um sinal senoidal com frequência de 55 kHz ao primário, medindo a tensão no secundário em aberto e aplicando os valores práticos na relação descrita em (6). O erro médio (calculado por meio da expressão  $erro = \frac{V_{pratic} - V_{teor}}{V_{teor}}$ ) apresentado foi de 1,4 %, o que indica uma aproximação adequada entre as equações implementadas e o resultado prático.



**Figura 15:** Comportamento prático e teórico do coeficiente de acoplamento magnético para diferentes valores de  $c$ .

Tendo em mente que o modelo utilizado é válido para um enlace cujo primário e secundário estão devidamente projetados para uma mesma frequência de ressonância, é interessante utilizar capacitores de precisão em  $C_1$  e  $C_2$  e ainda se valer do uso de um analisador de impedância (Agilent 4294A) para ajustar corretamente o valor da frequência de ressonância angular  $\omega_0$  tanto para o primário quanto para o secundário. Para isso, utilizou-se capacitores com precisão de 1%, que medidos apresentaram capacitâncias de 1,498 nF e 1,500 nF para  $C_1$  e  $C_2$ , respectivamente.

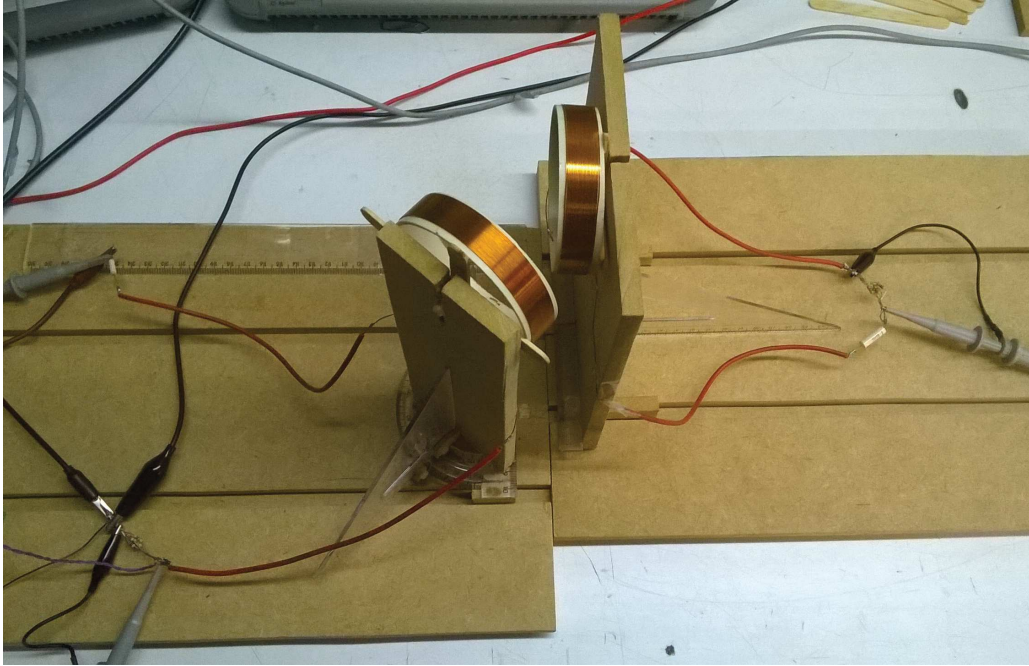
A tensão de entrada  $V_g$  foi obtida usando-se de um gerador de função Tektronix CFG253, que foi ajustado, com o auxílio de um osciloscópio Agilent MSO6034, para um sinal senoidal a 452 kHz e tensão *rms* de 7,6 V. Como o correto dimensionamento das perdas no sistema possibilita uma melhor avaliação do mesmo através do modelo matemático, optou-se por aferir a resistência de entrada da fonte, que resultou em  $R_g = 47,7 \Omega$ .

Para medir a corrente no primário foi inserida uma resistência de prova  $R_s$  de  $10,9 \Omega$  em série (ver figura 13), que somada a resistência de entrada e a resistência série do circuito  $L_1C_1$ , resultaram em uma resistência total no primário de  $60,9 \Omega$ . Já no secundário, considerando uma carga de  $10,9 \Omega$  e a resistência série do circuito  $L_2C_2$  aferiu-se uma resistência total  $R_2$  de  $13,29 \Omega$ .

Para realização dos ensaios, montou-se uma estrutura de madeira para facilitar e padronizar a alteração das distâncias  $c$ ,  $d$  e  $e$ , além do ângulo  $\theta$  (ver figura 9). Esta estrutura é



apresentada na figura 16, sendo que as bobinas foram fixadas com parafusos de náilon que não influenciam o campo magnético gerado pelas bobinas. Foram fixadas à estrutura duas régua para obtenção de marcações milimétricas das distâncias  $c$  e  $d$  e um transferidor para auxiliar no ajuste do ângulo relativo entre as bobinas.

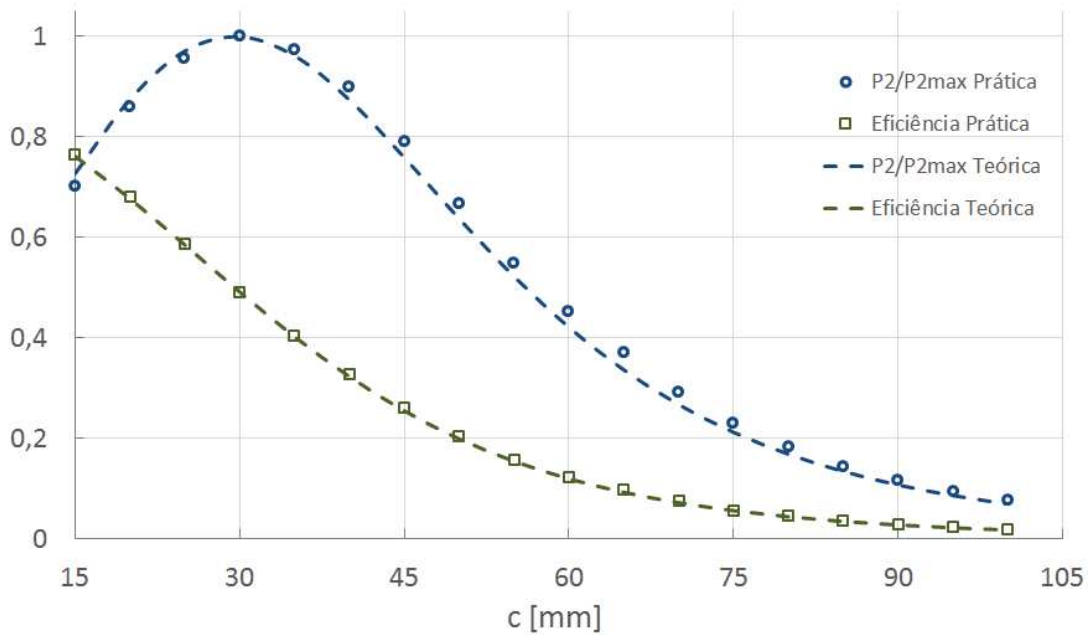


**Figura 16: Estrutura de testes confeccionada para realização dos ensaios experimentais.**

A figura 17 apresenta o comportamento prático e teórico da eficiência e potência relativa para o sistema de *WPT* projetado. As curvas teóricas foram obtidas aplicando-se a indutância mútua teórica e as especificações do sistema às equações (15) e (16). As curvas práticas foram obtidas mensurando, com o auxílio do osciloscópio, os parâmetros elétricos no primário e secundário para diferentes valores de  $c$  considerando uma situação de perfeito alinhamento. Por meio da tensão sobre o resistor  $R_s$  calculou-se a corrente no primário  $i_1$ . O quadrado da corrente vezes as perdas totais no primário forneceram a potência  $P_1$ . Analogamente, por meio da tensão na carga, calculou-se a corrente no secundário  $i_2$  e posteriormente a potência entregue ao secundário  $P_2$ . De posse destes valores, usando (15) e (16) calculou-se a eficiência energética do sistema e a potência transmitida relativa, respectivamente.

O erro médio da eficiência energética foi de 2,0 %, enquanto o erro médio da potência relativa foi de 6,14 %. Nota-se que estas duas curvas características aproximam-se consideravelmente às curvas teóricas corroborando tanto o sistema projetado como o próprio modelo matemático utilizado.

Quanto ao seu comportamento, nota-se que a potência relativa e a eficiência são dependentes. Ao acoplar magneticamente os dois circuitos, a impedância do secundário que depende



**Figura 17: Comportamento prático e teórico da eficiência energética e da potência relativa do sistema de WPT projetado.**

da  $M$  formada entre as bobinas é refletida no primário alterando a impedância total do circuito equivalente. Quando alinhadas e paralelas, a medida que as bobinas se aproximam aumenta-se o  $k$ , e conseqüentemente, a  $P_2/P_{2max}$  e a  $\eta$ . A  $P_2/P_{2max}$  atinge seu valor máximo quando  $k$  é suficiente para que a impedância refletida do secundário se iguale à impedância do primário. Neste momento a eficiência atinge 50 %. No entanto, ao aumentar o  $k$ , aproximando as bobinas ainda mais, a  $\eta$  também aumenta mas a  $P_2/P_{2max}$  começa a diminuir.

Este comportamento da WPT a duas bobinas indica que dependendo da aplicação, aproximar a bobina o máximo possível pode não ser a condição ideal. Por exemplo, caso deseje-se realizar uma comunicação por meio do enlace, é interessante identificar a posição relativa em que há uma MPT. Já em uma transferência de energia, obter uma adequada relação de  $P_2/P_{2max}$  e  $\eta$  pode ser mais interessante.

Com o intuito de avaliar e melhor compreender a relação entre as perdas no circuito, o  $k$ , e a condição de MPT repetiu-se a aquisição das curvas de  $\eta$  e  $P_2/P_{2max}$  para diferentes valores de carga. As curvas características da eficiência energética para  $R_L$  igual a 10,9, 32,85 e 99,43  $\Omega$  são apresentadas na figura 18, enquanto as curvas da potência relativa são apresentadas na figura 19. Observa-se que, como descrito pelo modelo matemático, a eficiência na transmissão de energia decai quanto maior as perdas no primário e secundário. Portanto, quanto maior a carga, verificou-se uma eficiência energética do sistema reduzida para todas as distâncias mensuradas, uma vez que para  $R_L$  igual a 99,43  $\Omega$  a eficiência máxima alcançada a 15 mm de distância foi de 30,4 %, e para 10,9  $\Omega$  alcançou-se 76,1 %.

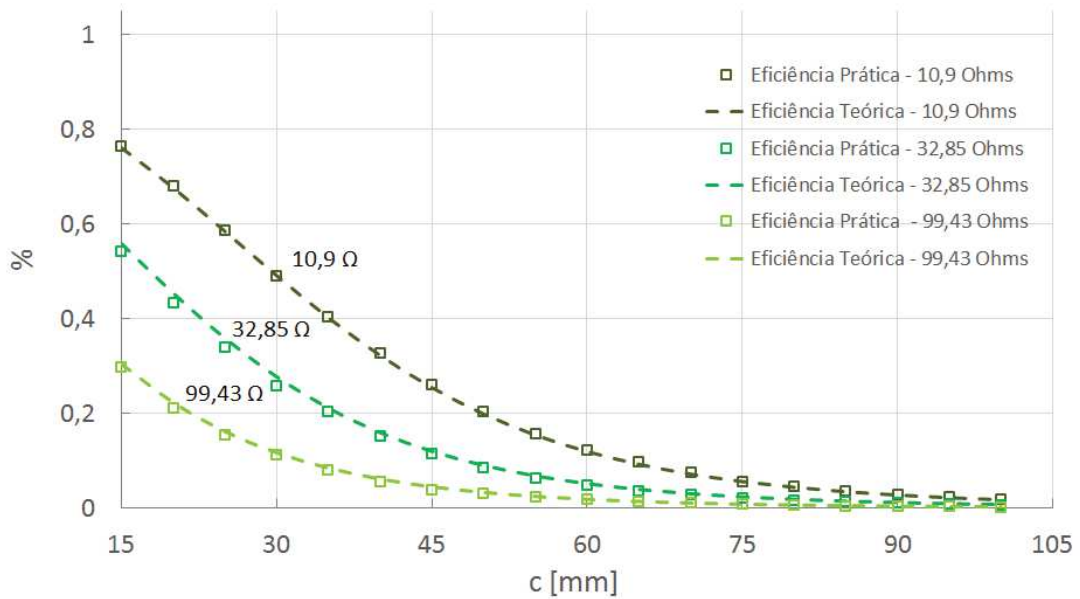


Figura 18: Comportamento prático e teórico da eficiência energética para diferente valores de carga.

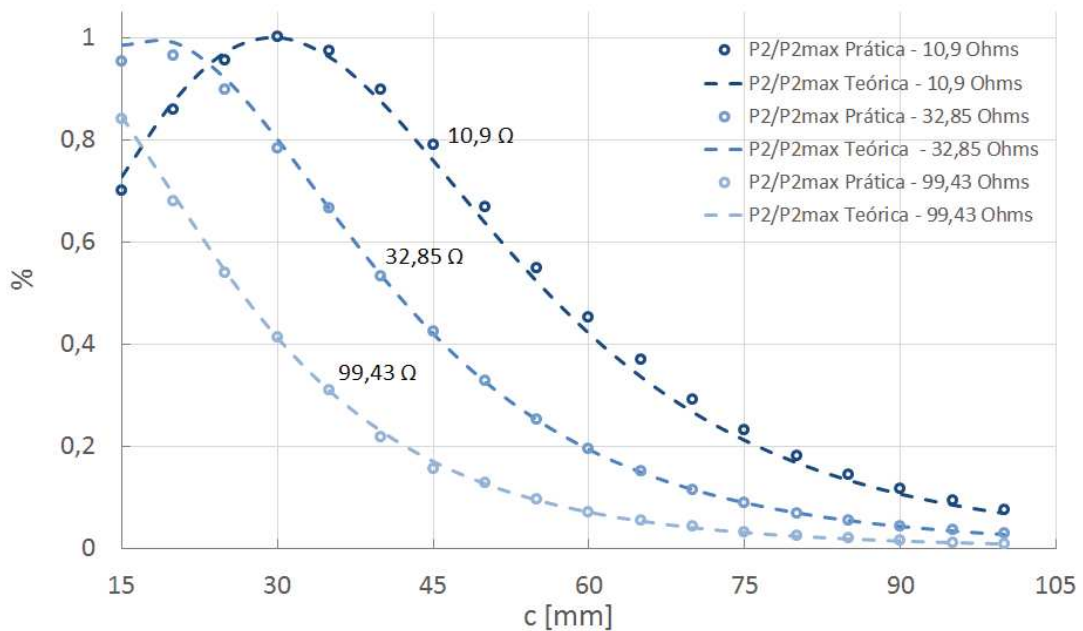


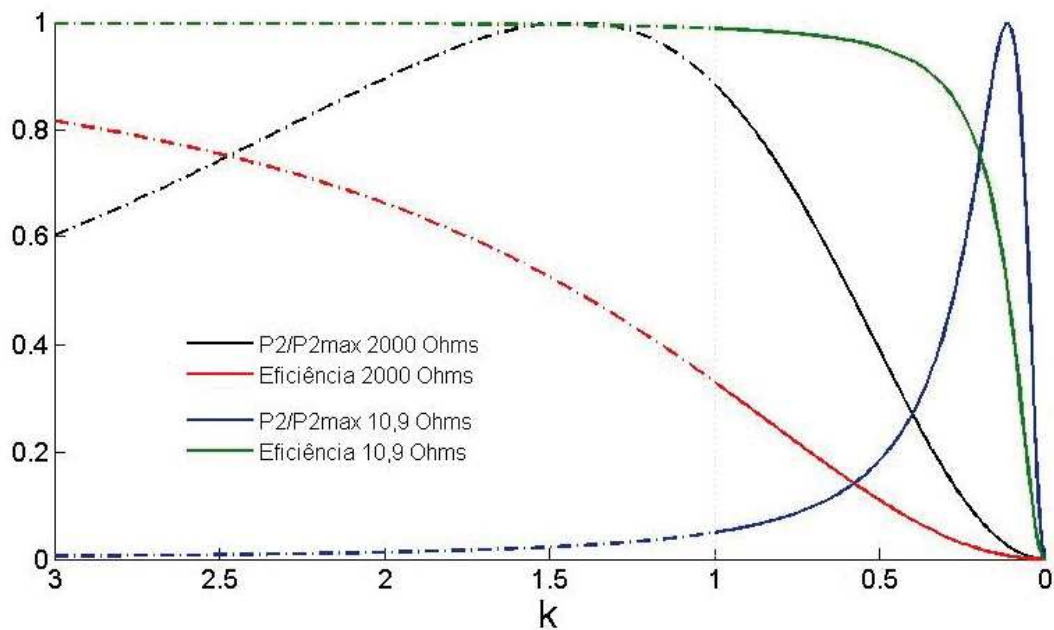
Figura 19: Comportamento prático e teórico da potência relativa entregue ao secundário para diferente valores de carga.

Já quanto à potência relativa, observou-se que o sistema alcançou a condição de *MPT* tanto para uma carga de 10,9  $\Omega$ , quanto para 32,85  $\Omega$ , enquanto que para 99,43  $\Omega$  a máxima  $P_2/P_{2max}$  foi de 84,6 %. Esta característica corrobora a influência do  $k$  na *WPT*. Ao elevar as perdas no secundário verificou-se a necessidade de aumentar o  $k$  e, portanto, aproximar ainda mais as bobinas. No caso prático em que a carga era igual 99,43  $\Omega$ , aproximar até 15 mm de distância não foi o suficiente para obter-se um acoplamento forte o bastante para que a condição

de *MPT* ocorre-se. Isto é exatamente o que diz o modelo matemático, uma vez que a condição de *MPT* ocorre quando  $\omega_0^2 M^2 = R_1 R_2$ . A medida que se aumenta  $R_2$ , a indutância mútua formada pelas bobinas ou a frequência de ressonância deve aumentar.

Na prática, é impossível obter um  $k$  superior a 1, e esta condição ocorre exatamente quando todas as linhas de fluxo magnético geradas pelas espiras da primeira bobina passam por todas as espiras da segunda. Portanto, dependendo das especificações do enlace, obter uma *MPT* ou uma  $\eta$  específica não é possível.

Para visualizar esta situação crítica, foi simulado um sistema de *WPT* ao qual um  $k$  menor que 1 não é suficiente para obter uma *MPT*. A figura 20 apresenta o comportamento da *WPT* em relação ao  $k$ , considerando tanto o intervalo fisicamente realizável (*i.e.*  $0 < k < 1$ ) quanto valores superiores a 1. Observou-se que para uma carga de  $10,9 \Omega$  é possível obter uma *MPT* com um acoplamento de 0,11, porém, para uma carga de  $2 \text{ k}\Omega$  o  $k$  necessário seria de 1,43, o que é impossível de ser realizado.



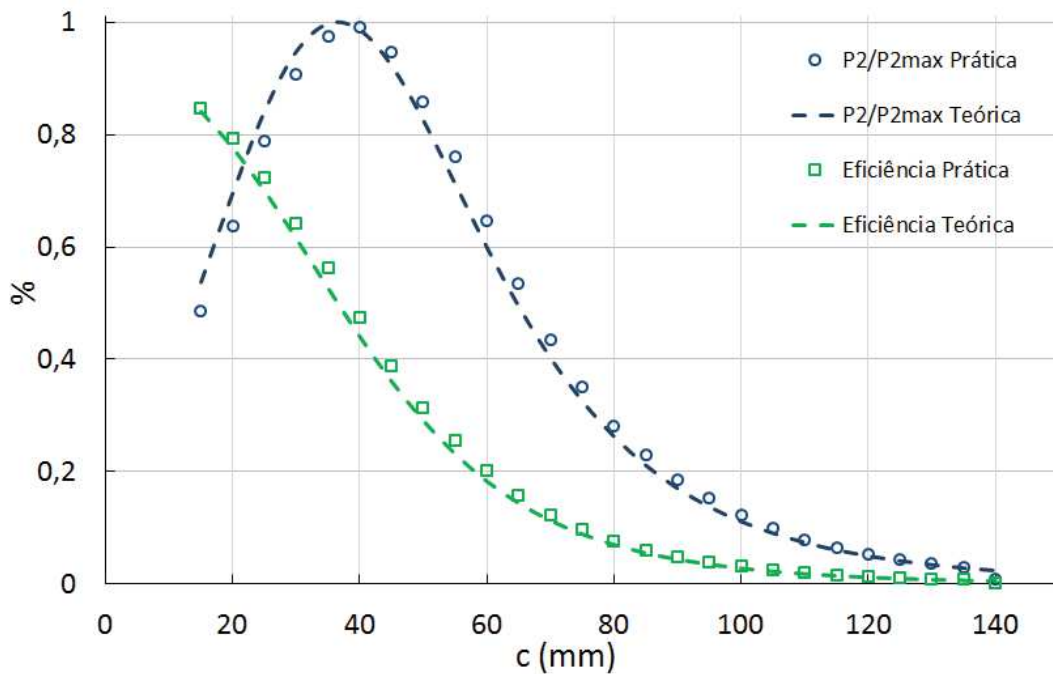
**Figura 20:** Comportamento da  $P_2/P_{2max}$  e  $\eta$  em relação ao  $k$  para  $R_L$  igual a  $2 \text{ k}\Omega$  e  $10,9 \Omega$ .

Outro ponto interessante é que o enlace construído permite chegar a um  $k$  igual a 0,11 quando  $c$  é aproximadamente 30 mm, e o valor máximo obtido a 15 mm de distância foi 0,22 apenas (ver figura 15). Isto considerando uma situação de perfeito alinhamento. Entretanto, em situações de desalinhamento, o  $k$  irá depender não apenas da distância  $c$ , mas também do deslocamento  $d$ ,  $e$  e a orientação relativa das bobinas.

Compreendendo a relação e os parâmetros necessários para obter uma *MPT*, optou-se

por reduzir ainda mais as perdas no primário e secundário para obter um ponto de *MPT* à maior distância  $c$  possível. Para isso, verificou-se a possibilidade de alterar a resistência de prova e a carga, uma vez que a resistência da fonte e as resistências série dos indutores são intrínsecas dos seus componentes. Desta forma,  $R_s$  foi alterada para uma resistência de  $7,19 \Omega$  e  $R_L$  para  $6,56 \Omega$ .

A  $\eta$  e  $P_2/P_{2max}$  do sistema com as novas especificações são apresentadas na figura 21. Ainda corroborando o comportamento da *WPT* a duas bobinas, observou-se que ao reduzir tanto as perdas no primário quanto no secundário o  $k$  necessário para obter uma condição de *MPT* também reduziu-se e, conseqüentemente, a distância  $c$  aumentou para 39 mm.



**Figura 21:** Comportamento prático e teórico da  $P_2/P_{2max}$  e da eficiência energética  $\eta$  para  $R_s = 7,19 \Omega$  e  $R_L = 6,56 \Omega$ .

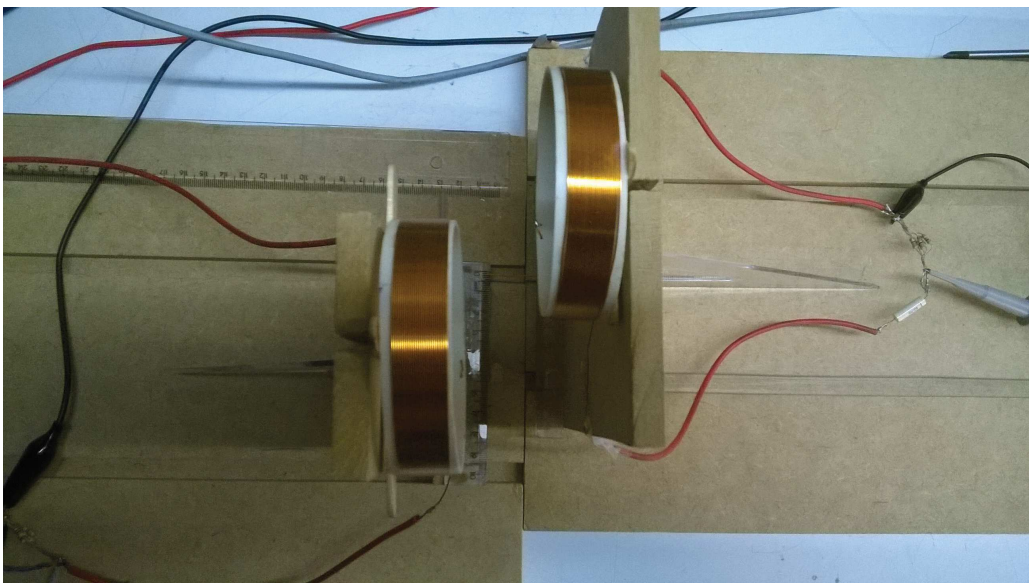
#### 4.1.1.1 INFLUÊNCIA DE DESALINHAMENTOS LATERAIS E ANGULARES

Projetado e implementado o sistema de *WPT*, iniciaram-se as investigações sobre a influência de diferentes desalinhamentos sobre o sistema em si e, principalmente, sobre a condição de *MPT*, visando observar características e singularidades do comportamento da *WPT* que possibilitem prover uma nova abordagem para estimativa da posição de uma bobina implantada.

Tendo em vista que na condição de *MPT*, a corrente no primário cai a 50 % de sua corrente máxima, montou-se um circuito em uma placa de testes padrão para detectar esta faixa de corrente. O circuito consiste de um comparador de janela implementado com amplificadores

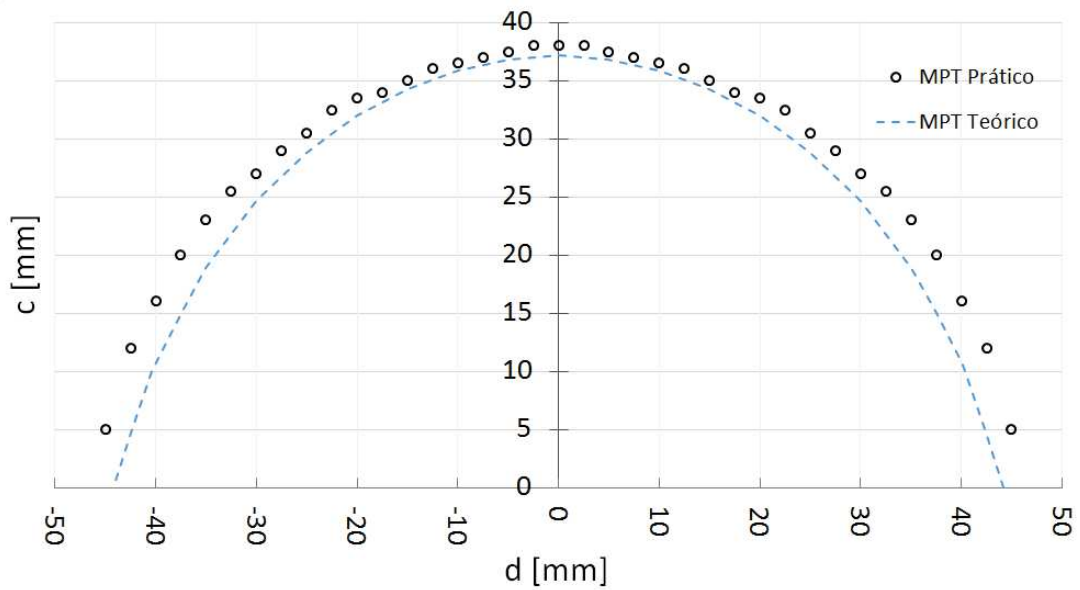
operacionais que comparam o valor da tensão sobre o resistor  $R_s$  que é diretamente proporcional a corrente no primário. As tensões de referência dos comparadores foram ajustadas de acordo com a corrente máxima, obtida quando as bobinas estão posicionadas de forma a não haver um acoplamento magnético entre elas.

Desta maneira, com o auxílio da estrutura de testes, ajustou-se as bobinas a um ângulo relativo igual a  $0^\circ$  e fixando as bobinas a determinados valores de  $d$  (ver figura 6(b)), variando de  $-45$  mm a  $45$  mm, movimentou-se a bobina  $L_2$  no eixo  $z$  até se obter a distância  $c$  na qual a corrente atinge aproximadamente 50 % (ajustou-se o comparador para valores entre 46 % e 54 %). A montagem deste experimento e os resultados são apresentados respectivamente nas figuras 22 e 23, respectivamente, descrevendo o comportamento da condição de *MPT* frente ao desalinhamento lateral das bobinas. Observou-se um erro médio entre as curvas práticas e teóricas de aproximadamente 12 % e que a medida que se aumenta o desalinhamento lateral há a presença de um desvio maior. Esta diferença percentual entre as curvas justifica-se principalmente devido ao próprio intervalo utilizado no comparador e as imperfeições nas bobinas. O esquema do circuito para auxiliar a aquisição dos pontos experimentais é apresentado no Apêndice A.



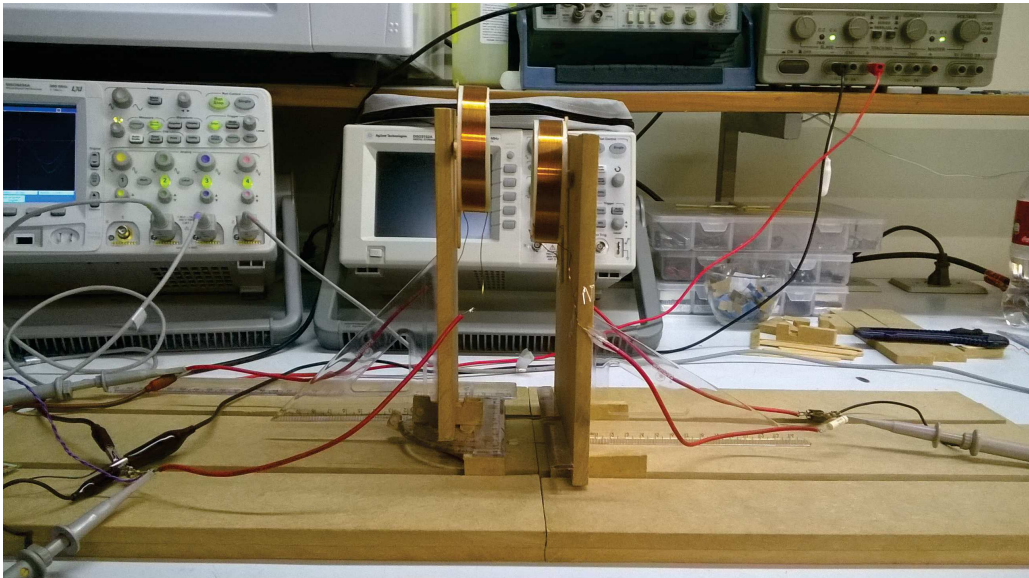
**Figura 22:** Disposição das bobinas  $L_1$  e  $L_2$  para investigação da influência do desalinhamento lateral sobre a *MPT*.

Observou-se que quanto maior o desalinhamento lateral, menor deve ser a distância  $c$  para obter o acoplamento necessário para *MPT*. Além disso, utilizando-se do método dos mínimos quadrados, observou-se que a relação entre as distâncias  $d$  e  $c$  segue uma equação de 2º grau, apresentando um  $R^2$  de 0,975.

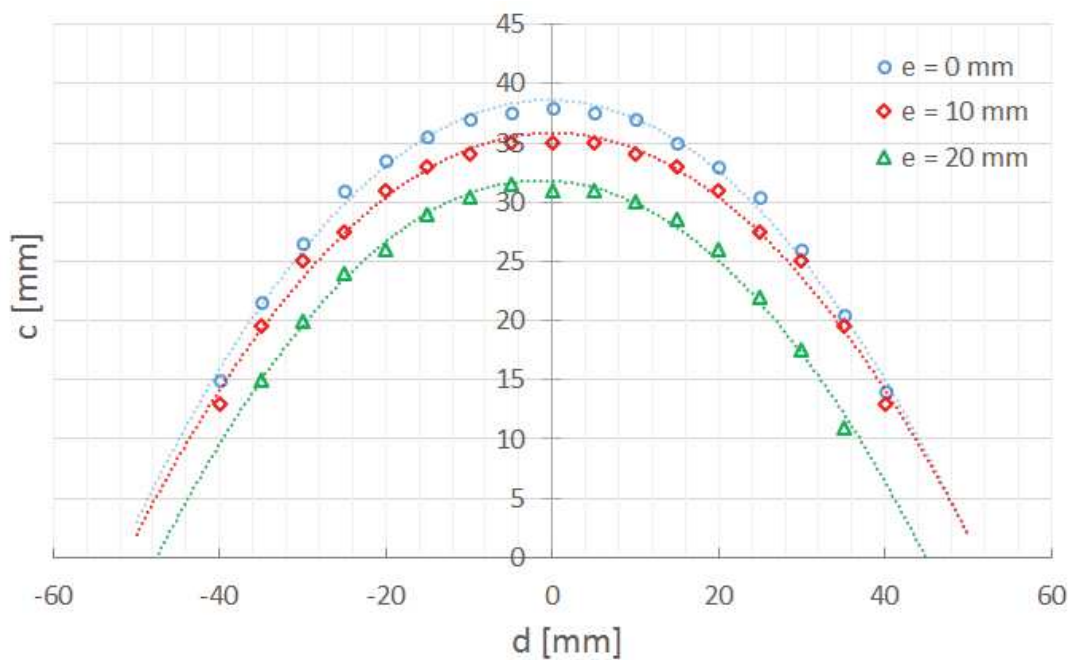


**Figura 23: Influência do desalinhamento lateral sobre a MPT.**

Posteriormente, repetiu-se o experimento adicionando, além de um deslocamento horizontal (por meio da variação da distância  $d$ ), um deslocamento vertical alterando a distância  $e$ . Para isso, fixou-se a bobina  $L_2$  a distâncias  $e$  iguais a 10 mm e 20 mm e repetiu-se o procedimento variando  $d$  e  $c$ , obtendo-se os pontos cuja MPT ocorre. A montagem deste experimento e os resultados são apresentados, respectivamente, nas figuras 24 e 25.



**Figura 24: Disposição das bobinas  $L_1$  e  $L_2$  para investigação da influência do desalinhamento lateral sobre a condição de MPT para diferentes valores de  $e$ .**



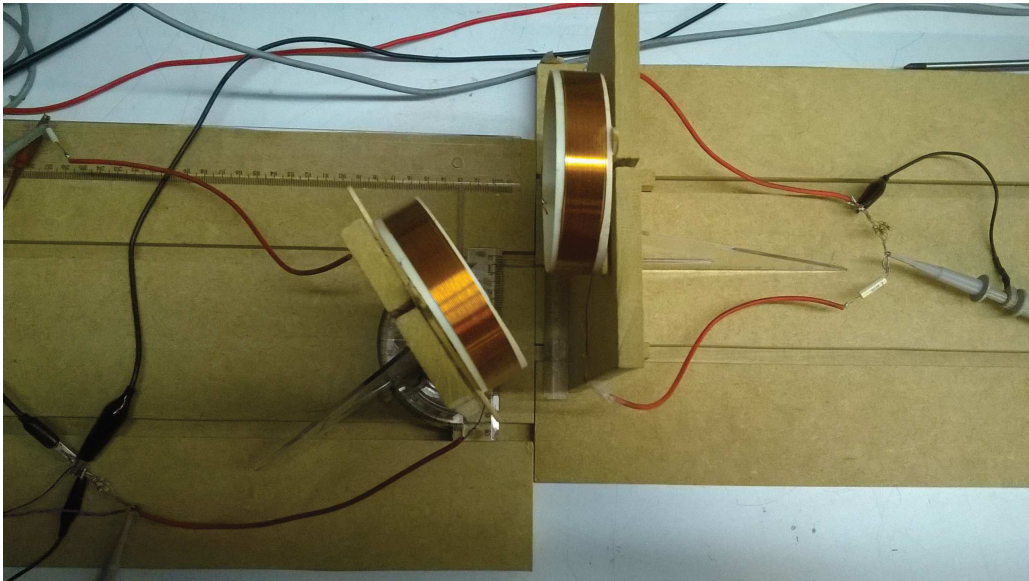
**Figura 25:** Comportamento da corrente no primário para condição de *MPT* considerando diferentes desalinhamento verticais.

Avaliando as três curvas, observou-se que mesmo adicionando um desalinhamento vertical, o comportamento da corrente a 50 % da corrente máxima segue uma equação de 2º grau, porém, a distância  $c$  máxima cuja *MPT* ocorre cai proporcionalmente ao aumento da distância  $e$ . Para  $e$  igual 0, 10 e 20 mm, obteve-se, respectivamente, um  $c$  máximo de 38, 35 e 31 mm. De fato, como as bobinas são circulares, alterar a distância  $d$  ou  $e$  causa a mesma influência sobre  $c$ .

As características observadas ao avaliar o desalinhamento mostraram-se promissoras para auxiliar no desenvolvimento de um método para determinar a posição relativa da bobina implantável. Uma vez que as bobinas estejam orientadas em planos paralelos, verificou-se que quanto mais próximo de um desalinhamento lateral nulo, maior é a distância  $c$  necessária para proporcionar uma *MPT*.

Todavia, em um caso prático, desalinhamentos angulares também são presentes e estudar sua influência sobre o acoplamento também é necessário para uma melhor compreensão da *WPT*. Para isso, fixou-se as bobinas a uma distância  $e$  igual a 0 mm, e repetiu-se os procedimentos anteriores para obtenção dos pontos de *MPT* considerando  $\theta$  igual a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . Na execução deste experimento, cuja disposição das bobinas é apresentada na figura 26, verificou-se uma maior dificuldade em obter o ângulo proposto sem inclinações e deslocamentos indesejados devido às limitações da estrutura desenvolvida.





**Figura 26:** Disposição das bobinas  $L_1$  e  $L_2$  para investigação da influência do desalinhamento lateral e angular sobre a condição de  $MPT$  considerando  $\theta$  igual a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ .

As figuras 27 e 28 apresentam esta influência do desalinhamento angular e lateral para  $e$  igual a 0 mm e 20 mm, respectivamente. Primeiro, considerando um desalinhamento vertical nulo (figura 27), observou-se que ao mudar a orientação relativa das bobinas, as curvas sofreram um deslocamento proporcional ao ângulo mas manteve-se uma distância  $c$  máxima próxima de 38 mm. Além disso, as quatro situações apresentaram correlação com um polinômio de  $2^\circ$  grau, com valores de  $R^2$  superiores a 0,961.

Em seguida, quando inserido um desalinhamento vertical de 20 mm, o comportamento frente às diferentes orientações se manteve, aproximando-se de uma parábola e deslocando mais seu vértice quanto maior o ângulo. No entanto, para  $\theta$  igual a  $60^\circ$ , ficou-se limitado a aquisição de apenas sete pontos experimentais, uma vez que ao deslocar-se verticalmente a bobina  $L_2$ , os pontos de  $MPT$  aproximaram-se da bobina  $L_1$  reduzindo o grau de movimentação da bobina sem que uma encostasse na outra, o que, conseqüentemente, reduziu a correlação a 0,90.

#### 4.1.2 COMPORTAMENTO DA CORRENTE NO PRIMÁRIO

Para obter uma melhor compreensão acerca do comportamento da corrente no primário, iniciou-se uma investigação abordando qual a sua relação à  $\eta$  e  $P_2/P_{2max}$  ao alterar apenas a distância  $c$  como já apresentado na figura 17. Analogamente à  $P_2/P_{2max}$ , definiu-se a relação entre a corrente no primário e a corrente máxima no primário como  $i_1/i_{1max}$ .

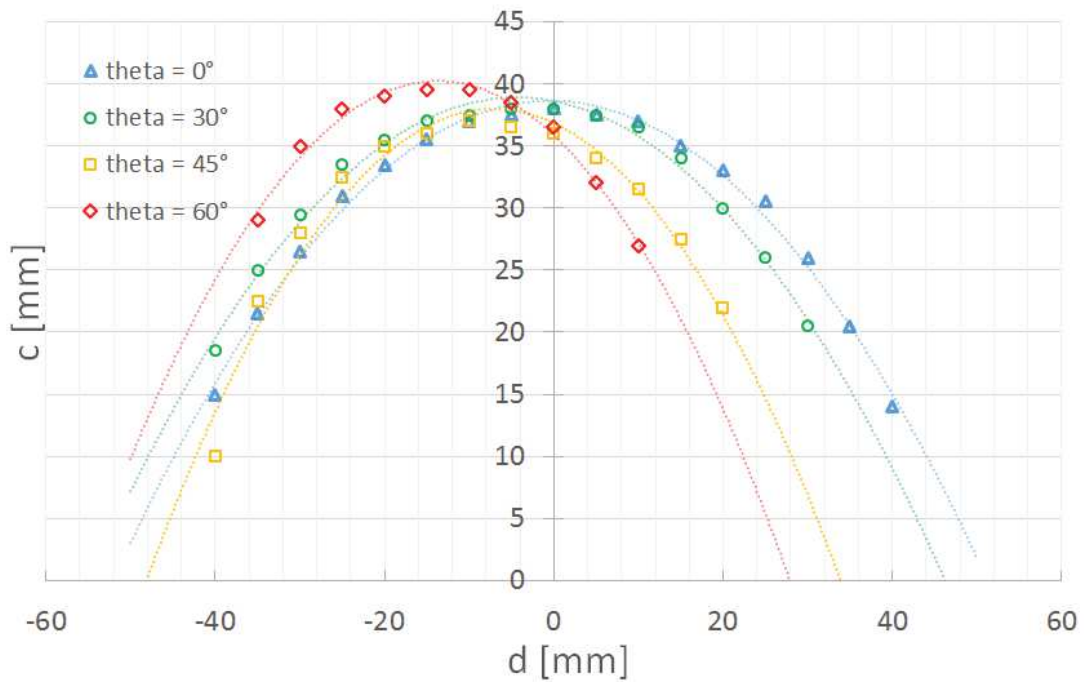


Figura 27: Comportamento da corrente no primário para condição de *MPT* considerando  $e = 0\text{mm}$  e  $\theta$  igual a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ .

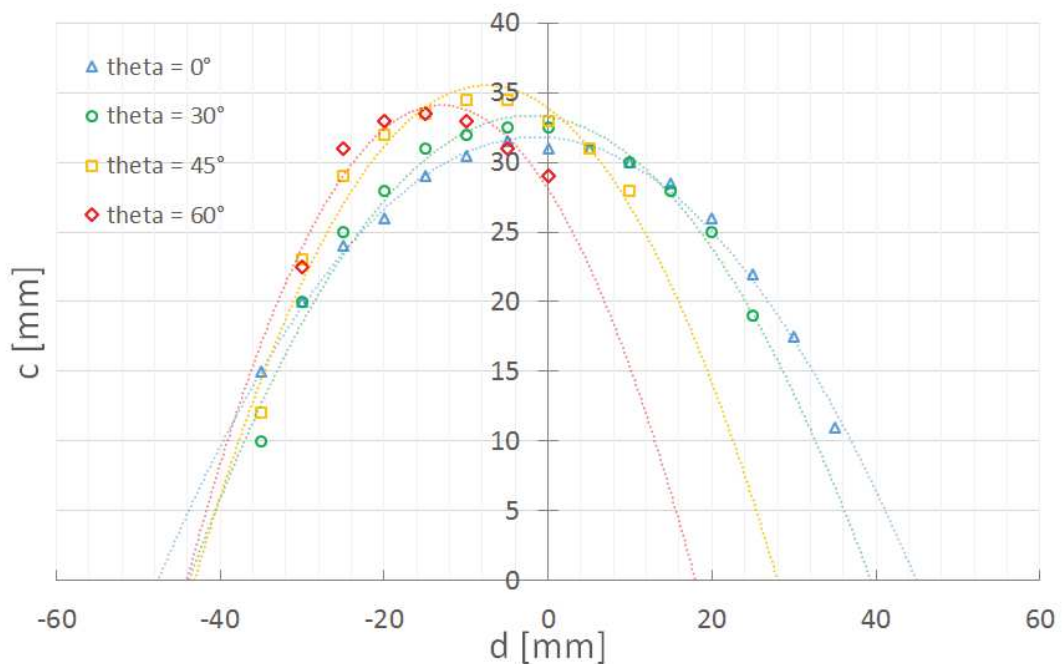
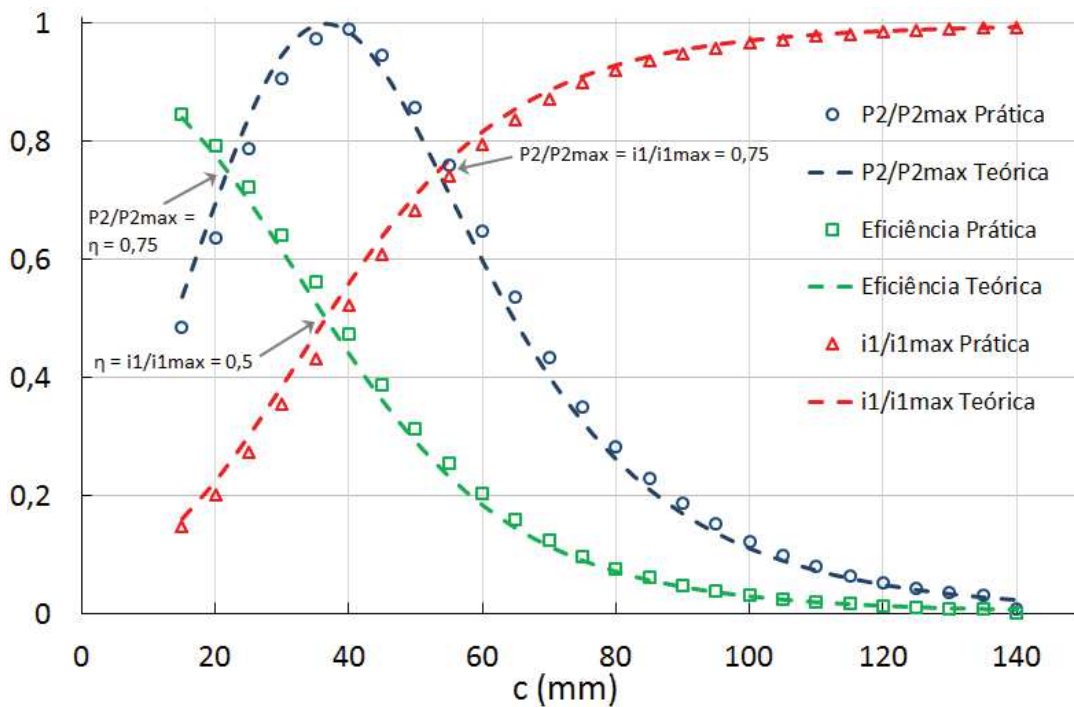


Figura 28: Comportamento da corrente no primário para condição de *MPT* considerando  $e = 20\text{mm}$  e  $\theta$  igual a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ .

No capítulo 3 foi apresentada a manipulação matemática que permite obter a expressão da  $i_1/i_{1max}$  e relacioná-la com a  $\eta$  e  $P_2/P_{2max}$ . Experimentalmente, calculou-se a corrente no primário a partir da tensão sobre o resistor  $R_s$  e dividiu-se pela corrente máxima obtida quando não há acoplamento magnético entre o primário e secundário. Desta forma, obteve-se o com-

portamento da corrente apresentado na figura 29 para o sistema de *WPT* utilizado na seção anterior. Nota-se que, como descrito pelo modelo matemático, há três pontos de intersecção formados pelas curvas de  $\eta$ ,  $i_1/i_{1max}$  e  $P_2/P_{2max}$ . O primeiro ponto ocorre quando a corrente relativa é igual a 25 %, nesta situação  $\eta$  e  $P_2/P_{2max}$  se cruzam em 75 %. O segundo ponto é o ponto de *MPT* estudado até então, cuja potência relativa atinge 100 % e  $i_1/i_{1max}$  e  $\eta$  cruzam em 50 %. O terceiro ponto ocorre quando a corrente e a potência relativas atingem 75 % enquanto a eficiência atinge apenas 25 %.



**Figura 29: Diagrama do esquema para obtenção da curva prática do coeficiente de acoplamento.**

Os resultados experimentais corroboram a equação e as relações deduzidas. A  $i_1/i_{1max}$  possibilita obter uma relação entre a posição da bobina e o nível relativo de acoplamento entre as bobinas apenas mensurando a corrente no primário, sem a necessidade de conhecer de fato as especificações de projeto do sistema de *WPT*.

Ao final dos estudos preliminares identificou-se as seguintes características no sistema de *WPT* projetado:

- A relação entre a distância  $c$  e  $d$  para obter o  $k$  necessário para uma *MPT* aproxima-se de uma curva polinomial de 2º grau.
- A influência de um desalinhamento angular sobre a *MPT* gera um deslocamento lateral da distância  $c$  máxima.

## 4.2 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA CORRENTE NO PRIMÁRIO

As características obtidas ao avaliar a influência do posicionamento e orientação da bobina sobre a corrente no primário se mostraram promissoras, indicando um padrão de comportamento que pode ser útil na definição de procedimentos para estimativa da posição da bobina. Como os primeiros estudos foram realizados utilizando bobinas com dimensões relativamente grandes, verificou-se a necessidade de projetar um sistema de *WPT* com dimensões mais críticas e que melhor representassem uma aplicação biomédica. Ao reduzir-se as dimensões da bobina do secundário, o fluxo magnético que passa pela bobina é diminuído, porém, pode-se fazer uso de núcleos ferromagnéticos para melhorar o  $k$  e, assim, compensar a redução das dimensões.

Desta forma, com o projeto de um novo sistema de *WPT*, busca-se observar e validar as características verificadas nos experimentos anteriores, como o comportamento da *MPT* em função dos desalinhamentos laterais e angulares. Além disso, levantou-se a hipótese deste comportamento se manter para correntes relativas diferentes de 50 %, devendo ser melhor esclarecido.

Novamente, utilizando-se o modelo matemático do sistema de *WPT* e avaliando os recursos disponíveis, projetou-se um enlace para uma frequência de aproximadamente 500 kHz utilizando duas bobinas circulares de apenas uma camada. A bobina do primário  $L_1$  foi construída com 40 mm de diâmetro e 6,1 mm de comprimento formada por 19 voltas de fio de cobre esmaltado 28 AWG e núcleo de ar. Já a bobina do secundário  $L_2$  foi construída com 5,5 mm de diâmetro e 17 mm de comprimento formada por 150 voltas de cobre esmaltado 37 AWG em um núcleo de ferrite.

A autoindutância medida das bobinas  $L_1$  e  $L_2$  foi de, respectivamente, 24,2  $\mu\text{H}$  e 275,2  $\mu\text{H}$  considerando o intervalo de 400 kHz a 600 kHz. Devido à utilização de um núcleo ferromagnético foi calculado o fator  $\mu_f$ . Este fator é empírico e depende do comprimento, raio e permeabilidade relativa do núcleo ferromagnético  $\mu_r$  (PICHORIM; ABATTI, 2004). Na prática,  $\mu_f$  pode ser determinado pela razão  $\mu_f = L_{2core}/L_{2air}$ . Para isso, calculou-se (via *software Matlab*) a autoindutância para uma bobina com as mesmas dimensões de  $L_2$  mas com núcleo de ar, obtendo-se um  $\mu_f$  de aproximadamente 8,1. As duas bobinas confeccionadas são apresentadas na figura 30.

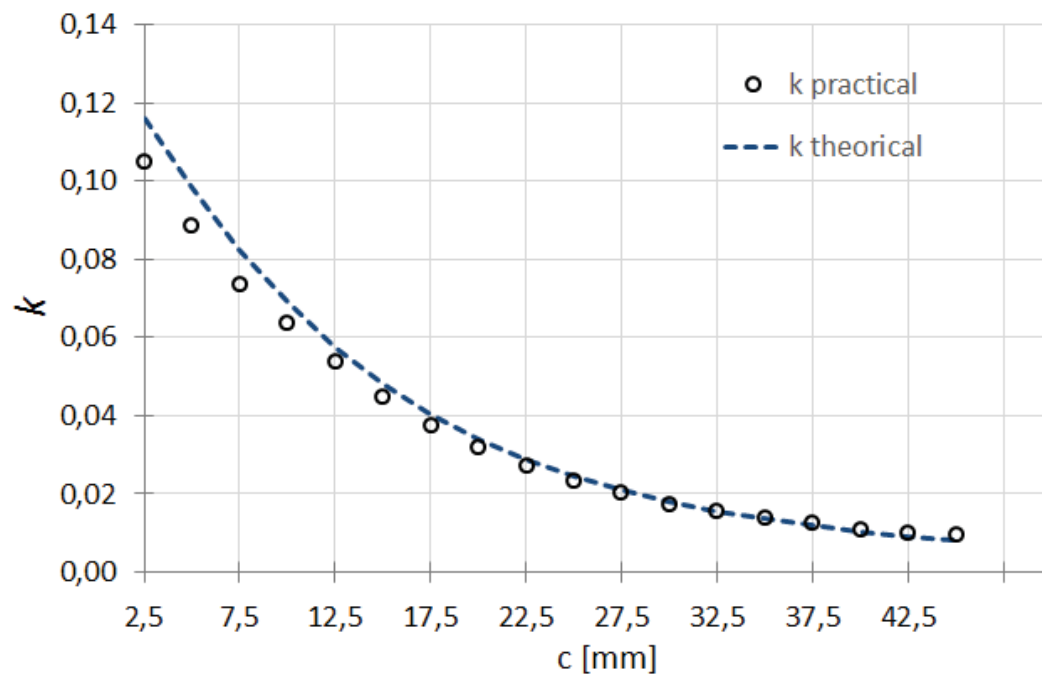
### 4.2.1 VALIDAÇÕES EXPERIMENTAIS

Para verificar o grau de aproximação do cálculo teórico da  $M$  e das autoindutâncias  $L_1$  e  $L_2$  obteve-se o comportamento prático do  $k$ . Para isso, utilizou-se uma tensão senoidal a 60



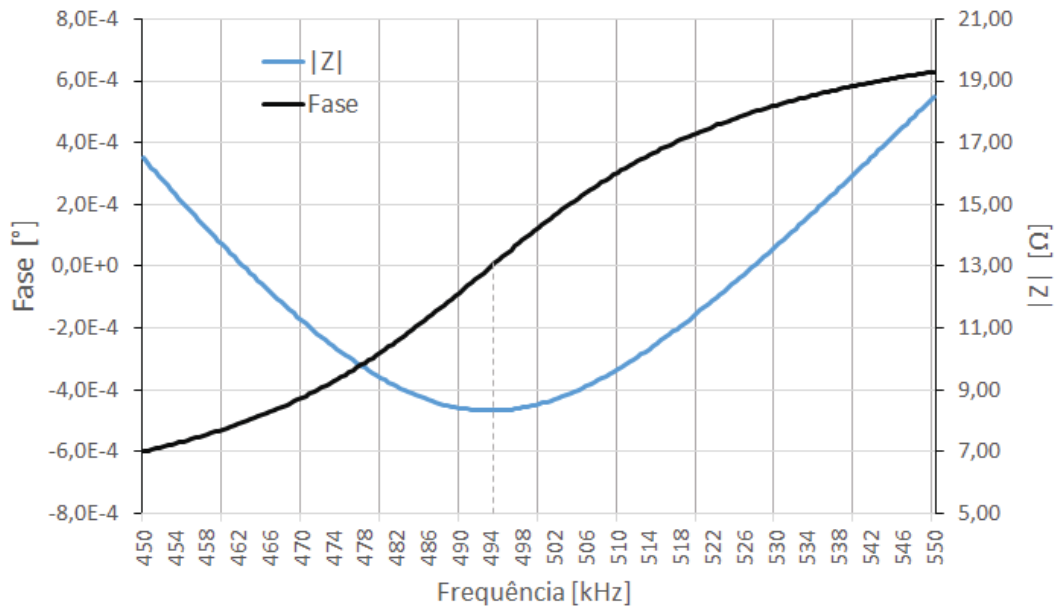
**Figura 30: Bobinas  $L_1$  e  $L_2$  confeccionadas.**

kHz para excitar a bobina do primário e calculou-se  $k$  seguindo (6). A figura 31 apresenta as curvas práticas e teóricas do  $k$  para uma situação de perfeito alinhamento, demonstrando que há uma boa aproximação entre os valores práticos e calculados uma vez que o erro médio foi de 6,5 %.



**Figura 31: Coeficiente de acoplamento magnético prático e teórico.**

Para projetar o sistema de *WPT* calculou-se os valores de capacitância ( $C_1$  e  $C_2$ ) necessários para uma frequência de ressonância próxima de 500 kHz. Utilizando-se capacitores de precisão obteve-se experimentalmente  $C_1 = 4,20$  nF e  $C_2 = 0,37$  nF, o que resultou em uma frequência de ressonância  $f_0$  prática de 494 kHz com uma variação de  $\pm 200$  Hz, como apresentado nas figuras 32 e 33. Neste procedimento de casamento das frequências de ressonância verificou-se que a autoindutância mais elevada no secundário ocasionou maior sensibilidade e um ponto de ressonância mais crítico que no primário. No ponto de ressonância no primário (i.e., fase igual a  $0^\circ$ ) o módulo da resistência série atinge seu valor mínimo de  $8,3 \Omega$  que somada à resistência da fonte resulta  $R_1$  igual a  $60,5 \Omega$ , enquanto no secundário aferiu-se uma  $R_2$  de  $12,8 \Omega$ . As especificações do sistema de *WPT* ajustado para uma  $f_0$  de 494 kHz são apresentadas na Tabela 2.

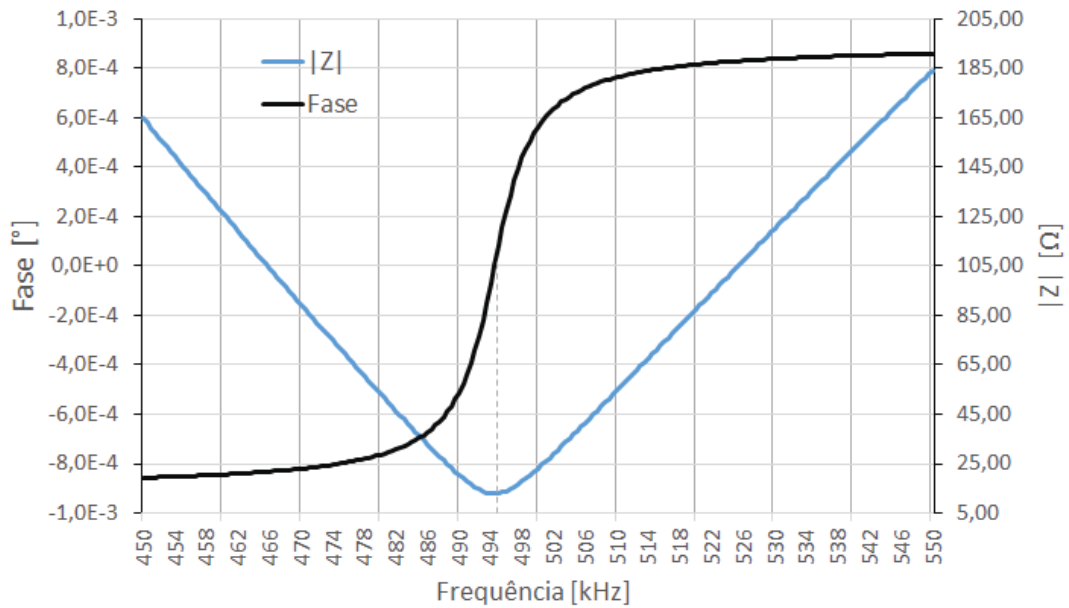


**Figura 32: Módulo e fase da impedância do primário (sem a resistência da fonte) mensurado no analisador de impedância.**

**Tabela 2: Especificação dos sistema de *WPT*.**

Especificação	Variável	Valor
Frequência de Ressonância	$f_r$	494 kHz
Tensão da Fonte	$V_g$	$1,3 V_{rms}$
Resistência da Fonte	$R_g$	$47,7 \Omega$
Resistência de Prova	$R_s$	$7,2 \Omega$
Resistência série do circuito $LC_1$	$R_{s1}$	$1,1 \Omega$
Resistência série do circuito $LC_1$	$R_{s2}$	$6,2 \Omega$
Resistência de carga	$R_L$	$6,6 \Omega$

**Fonte: Autoria Própria.**

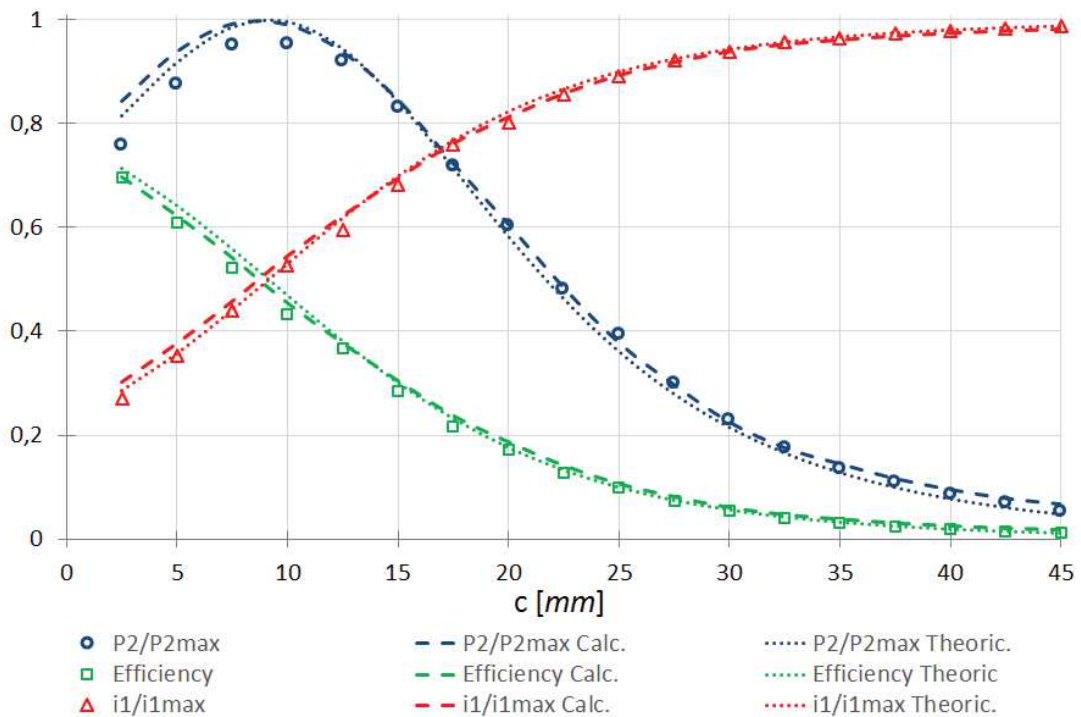


**Figura 33: Módulo e fase da impedância do secundário mensurado no analisador de impedância.**

Neste sistema, foi necessário atentar-se à limitação de potência na bobina do secundário, uma vez que o uso de cobre esmaltado a 37 AWG limitou o sistema a uma corrente na ordem de algumas dezenas de miliampères para que as perdas por efeito joule fossem comparativamente pequenas. Portanto, para reduzir estas possíveis perdas térmicas que influenciariam nos parâmetros a serem medidos, optou-se por utilizar uma tensão de entrada de  $1,3 V_{rms}$ .

A figura 34 apresenta as curvas (práticas, teóricas e calculadas) da potência relativa, eficiência e corrente relativa para uma situação de perfeito alinhamento, variando a distância  $c$  entre as bobinas por meio da estrutura de testes. O comportamento prático foi obtido mensurando-se a corrente no primário e secundário com auxílio do osciloscópio. Tanto os comportamentos teóricos e calculados apresentados foram obtidos inserindo-se as especificações do sistema às equações (15) e (16), porém, para as curvas calculadas aplicou-se os valores de indutância mútua práticos, enquanto que para as curvas teóricas aplicou-se a indutância mútua por meio das equações apresentadas em Babic e Akyel (2008).

Com o intuito de validar o novo sistema de *WPT* projetado, os resultados experimentais foram comparados às curvas teóricas. De fato, as curvas experimentais demonstraram aproximação adequada. A curva de potência relativa apresentou erro médio de 5,8 %, já as curvas de eficiência e corrente relativa apresentaram erros médios de 4 % e 1 %, respectivamente. Além disso, como descrito pelo modelo matemático, observa-se que a *MPT* ocorre exatamente quando  $i_1/i_{1max} = 0,5$  e  $\eta = 0,5$ , e quando a eficiência é de 25 % tanto  $P_2/P_{2max}$  quanto  $i_1/i_{1max}$  são iguais a 0,75.



**Figura 34:** Curvas características do sistema de WPT projetado. Valores práticos, teóricos e calculados da potência relativa no secundário, da corrente relativa no primário e da eficiência energética.

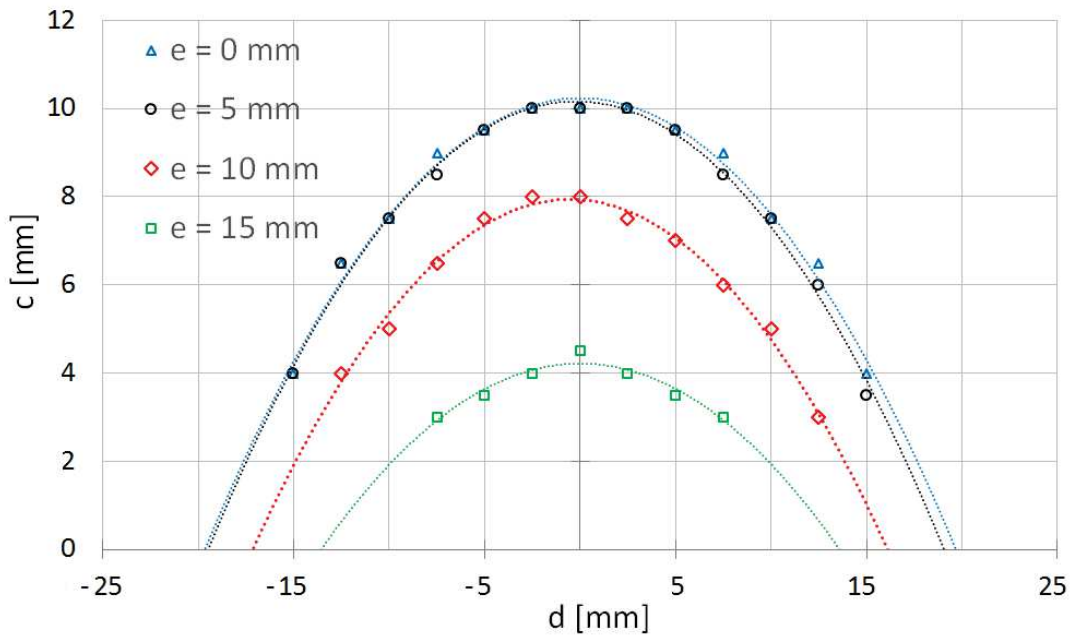
#### 4.2.2 DESALINHAMENTO LATERAL E ANGULAR

Após o devido projeto do sistema de WPT, realizou-se simulações e ensaios para avaliar a influência do posicionamento relativo das bobinas variando o ângulo relativo  $\theta$  e as distâncias  $c$ ,  $d$ , e  $e$  (ver figura 9). A primeira abordagem foi observar a característica do sistema de WPT para um desalinhamento horizontal. Para isso, fixou-se a distância  $d$  e variou-se  $c$  até que a corrente no primário fosse 50 % de sua corrente máxima e alterou-se posteriormente  $d$  em um intervalo de -30 mm a 30 mm com um ângulo relativo de  $0^\circ$  e  $e$  igual a 0 mm. Com o intuito de inserir também um desalinhamento vertical, realizou-se novamente a aquisição dos pontos, porém, para distância  $e$  igual a 5, 10, e 15 mm. A figura 34 apresenta os pontos experimentais para diferentes desalinhamentos laterais (vertical e horizontal) fixando a  $i_1/i_{1max}$  igual a 0,5.

Por meio dos pontos experimentais realizou-se o ajuste da curva pelo método dos mínimos quadrados aproximando-a a um polinômio de segundo grau. Por exemplo, para  $e = 0$  mm a expressão obtida na forma  $y = Ax^2 + Bx + C$  foi igual a  $y = -26,45x^2 + (1 \cdot 10^{-14})x + 0,01$  com um valor de  $R^2$  igual a 0,987.

Cada coeficiente deste polinômio pode ser relacionado com características importantes para uma correlação entre o posicionamento relativo das bobinas e o parâmetro elétrico avali-





**Figura 35:** Comportamento do sistema de WPT ( $i_1/i_{1max}$ ) para diferentes desalinhamentos laterais para  $\theta = 0^\circ$ .

ado. Enquanto o coeficiente  $A$  está relacionado com a distância focal da parábola,  $B$  está relacionado ao deslocamento da parábola no eixo  $x$ . Seguindo a mesma característica apresentada nos estudos preliminares, verificou-se que a parábola possui seu ponto máximo aproximadamente em  $d$  igual a zero, uma vez que  $B$  é igual a  $1 \cdot 10^{-14}$  mm, ou seja, a distância  $c$  máxima acontece exatamente quando as bobinas estão no mesmo plano e alinhadas, como mostra a situação 1 ilustrada pela figura 36. Já na situação 2 da figura 36 é ilustrada a posição da bobina para que a corrente no primário alcance o nível desejado em uma situação de desalinhamento lateral. Estes resultados, portanto, corroboram o comportamento apresentado pelo sistema de WPT projetado na seção 1 deste capítulo.

Em seguida, para avaliar a influência do desalinhamento angular, repetiu-se o procedimento anterior para  $\theta$  igual a  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $30^\circ$ . A figura 37 apresenta os pontos experimentais para um ângulo relativo de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $30^\circ$  para uma  $i_1/i_{1max} = 0,5$ . Para os 3 ângulos relativos estudados, um polinômio de segundo grau demonstrou aproximação adequada com  $R^2$  superior a 0,987. Além disso, ao adicionar um desalinhamento angular a curva característica se deslocou, alterando o ponto em que ocorre a situação de máxima distância em  $c$ , i.e., o vértice da parábola. Este comportamento também corrobora os resultados preliminares para uma  $i_1/i_{1max} = 0,5$ . Avaliando mais a fundo o polinômio ajustado aos pontos experimentais, observou-se um aumento do coeficiente  $A$  quando  $\theta \neq 0^\circ$ , o que implica em redução do ponto focal e, conseqüentemente, redução na concavidade da parábola.

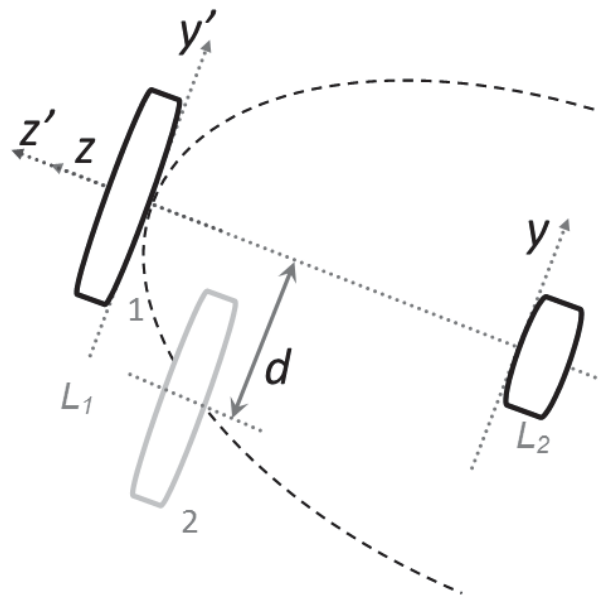


Figura 36: Ilustração do comportamento do sistema de WPT avaliando a corrente relativa no primário.

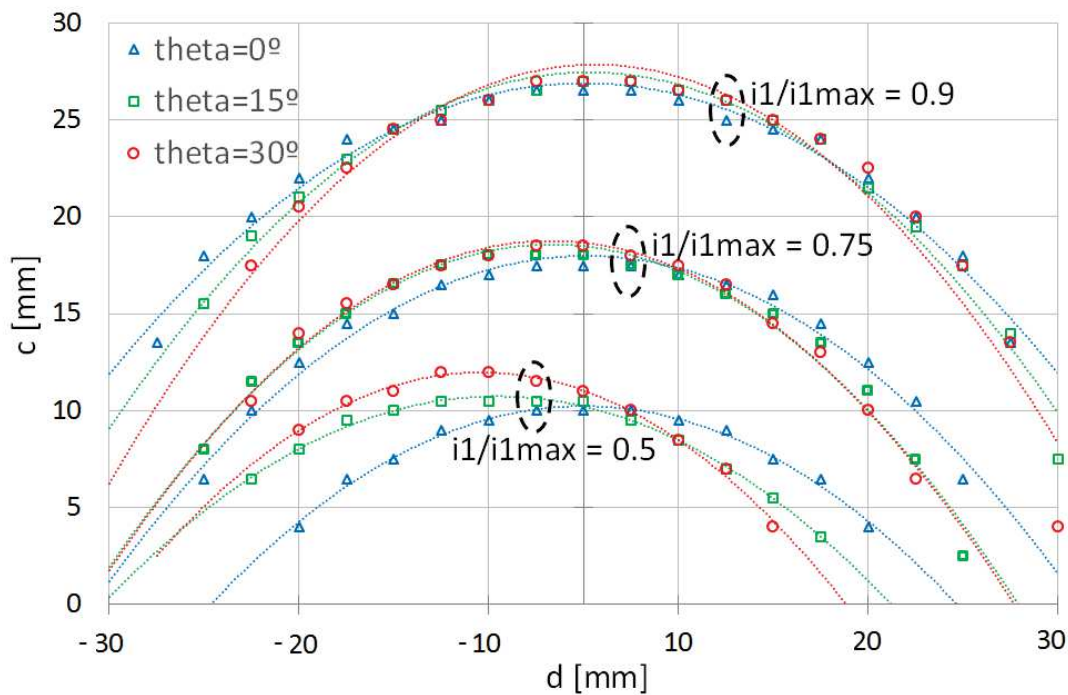


Figura 37: Ilustração do comportamento do sistema de WPT avaliando a corrente relativa no primário.

Com o intuito de verificar a hipótese das características observadas para  $i_1/i_{1max} = 0,5$  se manterem para outros níveis de corrente, repetiu-se os experimentos para 75 % e 90 % da corrente máxima do primário. Para auxiliar na comparação dos resultados, todos são apresentados na figura 37. Em primeiro lugar, observou-se que o comportamento parabólico da WPT se manteve para todos os níveis de corrente estudados, com valores de  $R^2$  maiores que

0,978 e 0,943, respectivamente, para 75 % e 90 %. Isto indica que o desalinhamento lateral tem uma influência relativa sobre o  $k$ , desde a faixa de  $i_1/i_{1max}$  a 50 % até 90 %. Além disso, ao fixar o valor de referência para 90 %, foi possível aumentar o grau de movimentação da bobina, uma vez que obteve-se uma distância  $c$  máxima de 27 mm, enquanto que para 75 % o valor cai para 18 mm e para 50 % é de apenas 10 mm.

Em seguida, observou-se a posição do vértice da parábola. Para uma corrente relativa de 75 % ainda pôde-se visualizar um leve deslocamento do vértice de acordo com o aumento do ângulo relativo, porém, este deslocamento não ultrapassou 0,5 mm para os ângulos abordados. Para  $i_1/i_{1max} = 0,9$ , o vértice se manteve no ponto  $d = 0$  mm e  $c = 27$  mm, o que indica que ao reduzir o acoplamento magnético, a ocorrência de um desalinhamento angular na faixa de  $0^\circ$  a  $30^\circ$  quase não tem influência sobre o vértice da curva característica.

## 5 APRESENTAÇÃO E RESULTADOS DO MÉTODO

A avaliação do comportamento da corrente no primário para diferentes situações de desalinhamento demonstrou ser uma potencial abordagem para o desenvolvimento de um método para estimar a posição relativa da bobina implantada. Uma vez que a curva de  $i_1/i_{1max}$  atenua quanto maior o deslocamento lateral entre as bobinas, levantou-se a hipótese de que ao percorrer uma reta com a bobina transmissora ( $L_1$ ) e esta estiver próxima o suficiente da bobina implantada, são detectados dois pontos da curva cuja corrente no primário alcança o nível desejado. Desta forma, desde que se mantenham trajetórias paralelas e mesmo ângulo relativo, a distância entre os dois pontos permitiria comparar uma situação de maior ou menor desalinhamento lateral.

Considerando duas bobinas perfeitamente circulares em uma situação cujo ângulo relativo é igual a  $0^\circ$ , o comportamento da corrente relativa segue uma parábola que, rotacionada em todo seu eixo, aproxima-se da superfície ilustrada na figura 38(a). Nota-se que a bobina implantada está orientada para o centro da superfície, ao qual ocorre o valor máximo de  $c$ . Ao mudar a orientação da bobina  $L_2$ , como ilustrado na figura 38(b), a distância  $c$  máxima ocorre em uma posição  $d$  diferente de 0 mm. Ou seja, ao mudar a orientação da bobina, a distância  $c$  máxima para que atinja o acoplamento desejado não é necessariamente em uma condição de alinhamento.

Isto pode ser observado com clareza ao mudar-se a orientação relativa das bobinas para  $90^\circ$  como apresentado na figura 39(a). As linhas de campo magnético estão perpendiculares à bobina e, portanto, o fluxo magnético que passa pela bobina  $L_2$  é quase nulo. O deslocamento lateral (figura 39(b)) das bobinas possibilita que linhas de campo magnético passem por  $L_2$  e assim estabeleça um  $k$  mais forte. Por esta razão, o parabolóide desloca-se de acordo com o aumento de  $\theta$ . Além disso, a superfície sofre um deslocamento de maior ou menor grau dependendo do acoplamento desejado. Como verificado nos resultados experimentais, utilizar um nível de corrente a 50 % da corrente máxima obtêm-se uma maior influência do desalinhamento angular sobre a posição da distância  $c$  máxima se comparado a  $i_1/i_{1max}$  de 90 %.

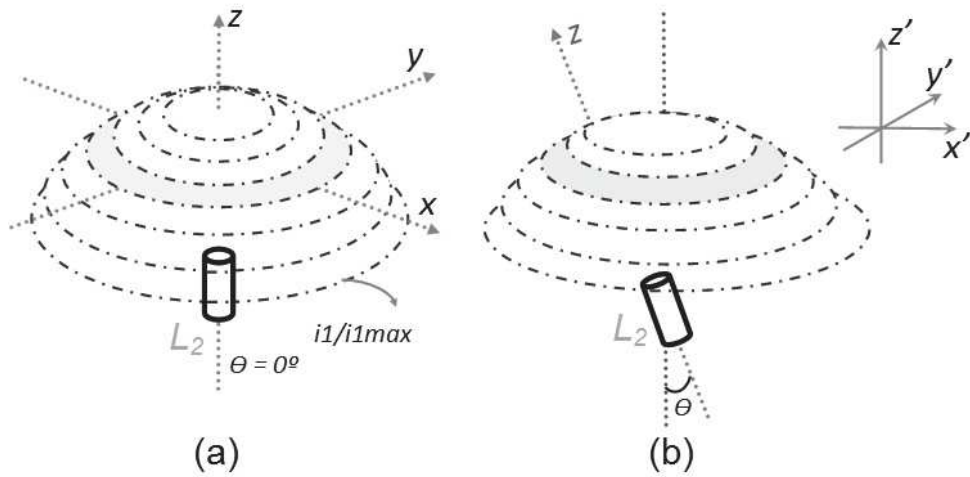


Figura 38: Ilustração do comportamento do sistema de WPT avaliando a corrente relativa no primário para  $\theta = 0^\circ$

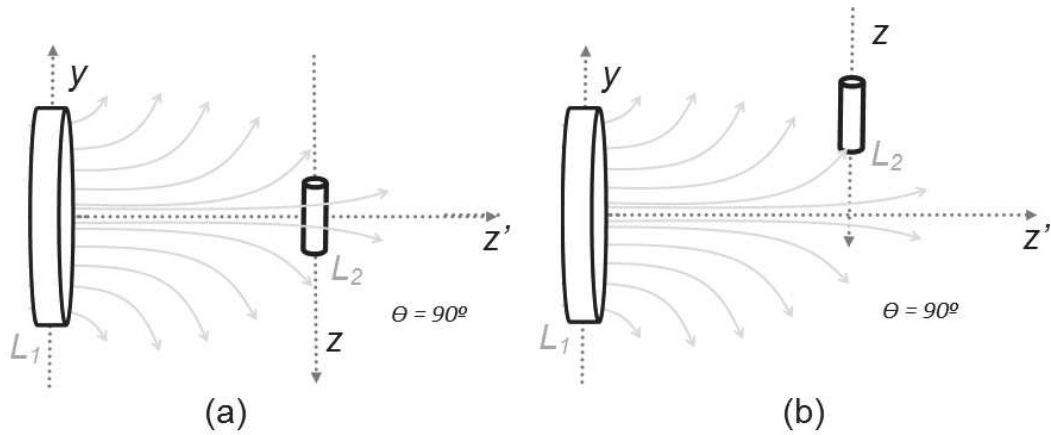


Figura 39: Ilustração do acoplamento entre duas bobinas com  $\theta = 90^\circ$  a) alinhadas e b) desalinhas lateralmente.

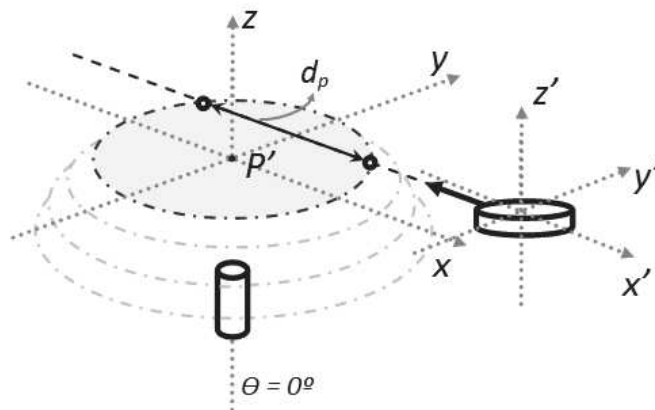
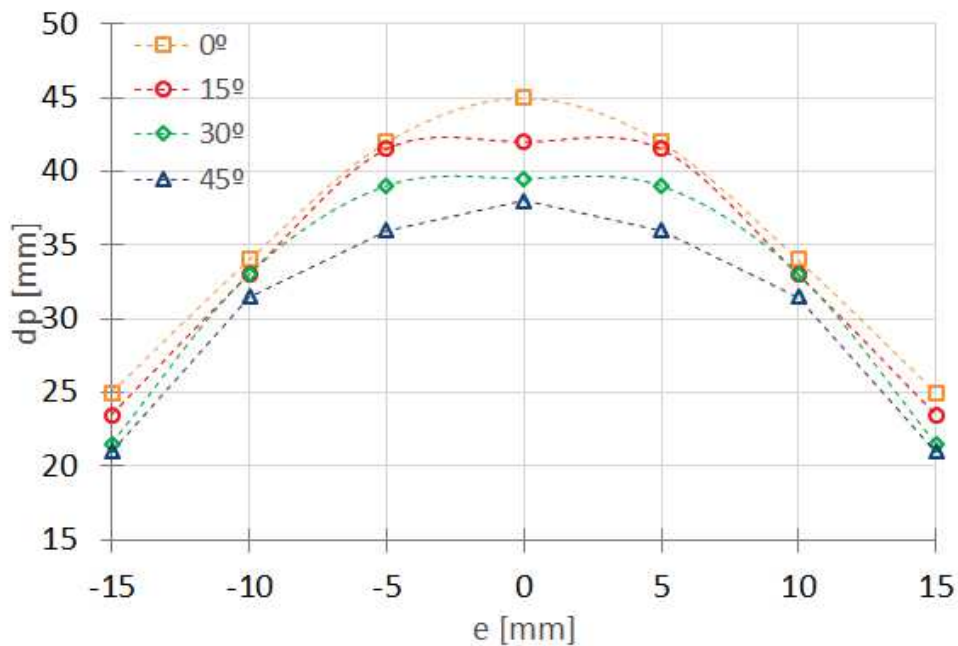


Figura 40: Ilustração do comportamento do sistema de WPT avaliando a corrente relativa no primário para  $\theta \neq 0^\circ$

A figura 40 ilustra o percurso realizado pela bobina  $L_1$  para detecção de duas intersecções da superfície formada pelos pontos em que a corrente no primário atinge o nível desejado. A intersecção entre a superfície e a trajetória retilínea formam um segmento de reta com comprimento  $d_p$ . A hipótese consiste, portanto, em avaliar o valor de  $d_p$  para diferentes trajetórias retilíneas em um mesmo plano, paralelas entre si, para corrigir o desalinhamento lateral entre as bobinas.

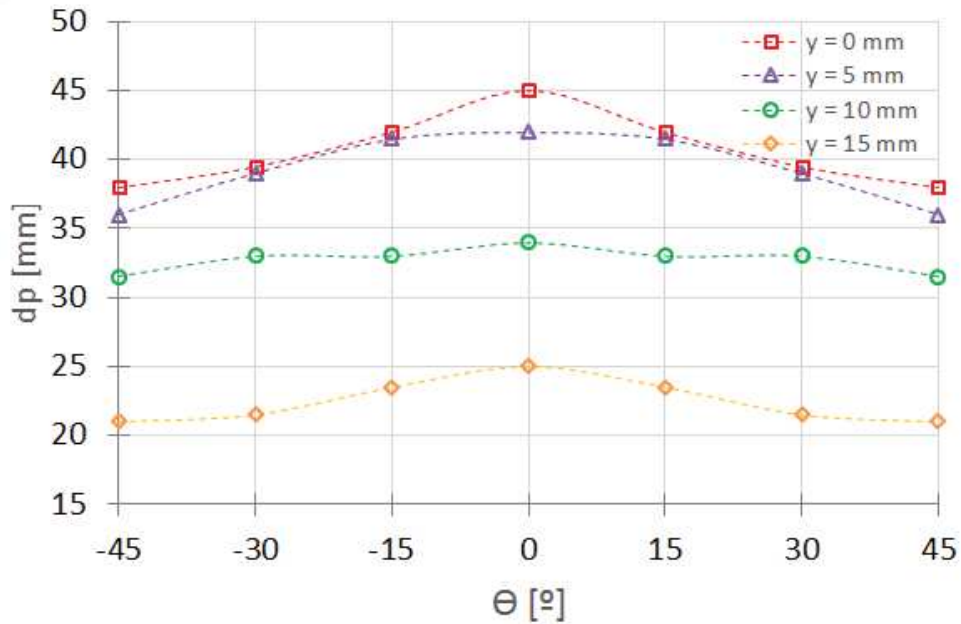
Em um primeiro momento, buscou-se avaliar a hipótese na própria estrutura de testes. No entanto, devido a dificuldade de se obter uma trajetória retilínea com precisão na estrutura desenvolvida e anotar os pontos de intersecção no espaço tridimensional ou a distância entre eles, optou-se por aliar a informação experimental, obtida ponto a ponto, com a simulação do procedimento em *Matlab*. Dentre as curvas experimentais obtidas, utilizou-se a  $i_1/i_{1max}$  de 0,9, uma vez que neste nível de corrente reduz possíveis limitações de distância para aplicação do procedimento se realizado em uma aplicação prática.

A trajetória retilínea a ser percorrida foi fixada a 15 mm da bobina implantável com ângulo relativo igual a  $0^\circ$ . Nestas condições a bobina transmissora poderia variar aproximadamente entre  $-45^\circ$  e  $45^\circ$  em relação ao seu próprio eixo sem tocar na bobina implantável. Testou-se a execução do procedimento para diferentes desalinhamento laterais variando a distância  $e$ . Além disso, a simulação do procedimento foi repetida para  $\theta$  igual a  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$ . O resultado desta simulação é apresentado na figura 41.



**Figura 41:** Relação entre a distância de intersecção da curva de corrente relativa e deslocamento lateral  $e$  para diferentes valores de  $\theta$ .

De início, observou-se que o maior desalinhamento lateral está relacionado inversamente com a distância  $d_p$ , uma vez que quanto mais próximo de  $e = 0 \text{ mm}$  maior foi o seu valor. Constatou-se também que há uma influência sobre  $d_p$  mesmo para  $\theta \neq 0^\circ$ , porém, esta influência quase não é evidente quando o desalinhamento esteve na faixa de  $-5$  a  $5 \text{ mm}$ . A influência do desalinhamento angular sobre o procedimento de ajuste do mesmo é melhor apresentada na figura 42.



**Figura 42:** Relação entre a distância de intersecção da curva de corrente relativa e ângulo relativo  $\theta$  para diferentes valores de  $e$ .

Para avaliar uma situação mais crítica, considerou-se uma bobina implantada à aproximadamente  $10 \text{ mm}$  e com um ângulo relativo à pele  $\phi$  igual a  $30^\circ$ , como ilustrado na figura 43. Para obter uma variação de  $-30^\circ$  a  $30^\circ$  sem que a bobina transmissora toque a pele, distanciou-se a trajetória retilínea a também  $10 \text{ mm}$ . A figura 44 apresenta  $d_p$  em relação ao desalinhamento lateral para a situação abordada, ao qual mostrou corroborar as características observadas validando a hipótese apresentada. Além disso verificou-se uma potencial aplicabilidade do procedimento para também ajustar o desalinhamento angular, porém, exige-se um ajuste prévio do desalinhamento lateral para obter uma melhor variação de  $d_p$ .

A característica do procedimento estudado frente ao desalinhamento lateral demonstrou ter uma faixa de  $-5$  a  $5 \text{ mm}$  em que não há alteração na distância  $d_p$ . Esta faixa é simétrica a  $0 \text{ mm}$ , podendo aproveitar desta característica para identificar não só o valor máximo de  $d_p$ , mas caso haja uma repetição destes valores, obter o valor médio obtendo um ponto mais próximo da origem. Já para a definição do ângulo relativo, a sensibilidade obtida foi menor em comparação à determinação da posição relativa apresentando uma faixa de  $-15^\circ$  a  $15^\circ$  cuja distância  $d_p$  não

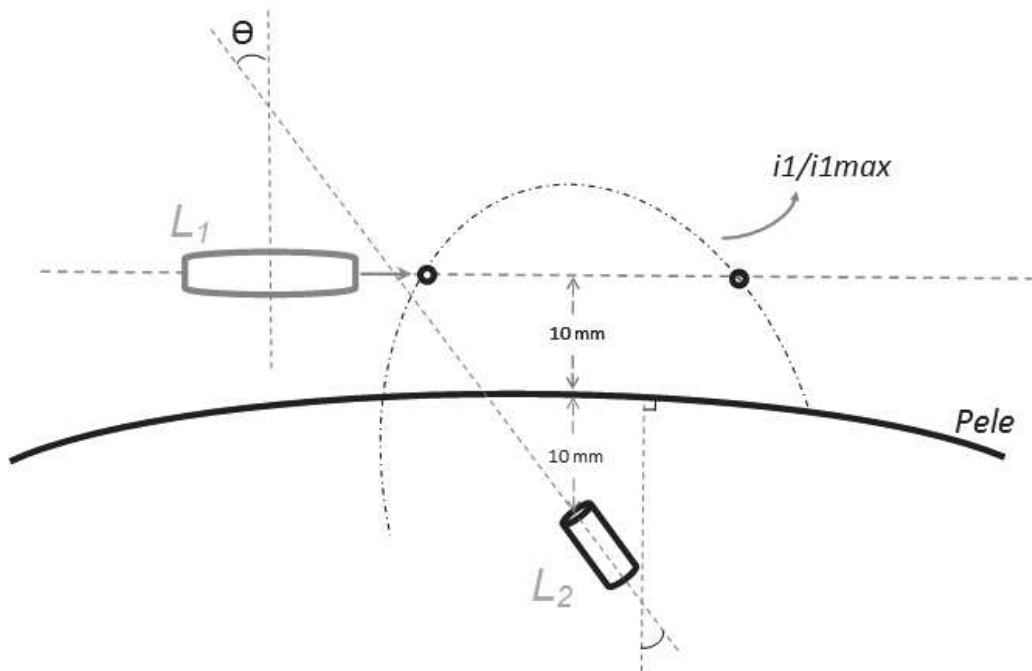


Figura 43: Ilustração do procedimento para detecção da distância  $d_p$  considerando uma bobina implantada com um ângulo relativo à pele  $\phi$ .

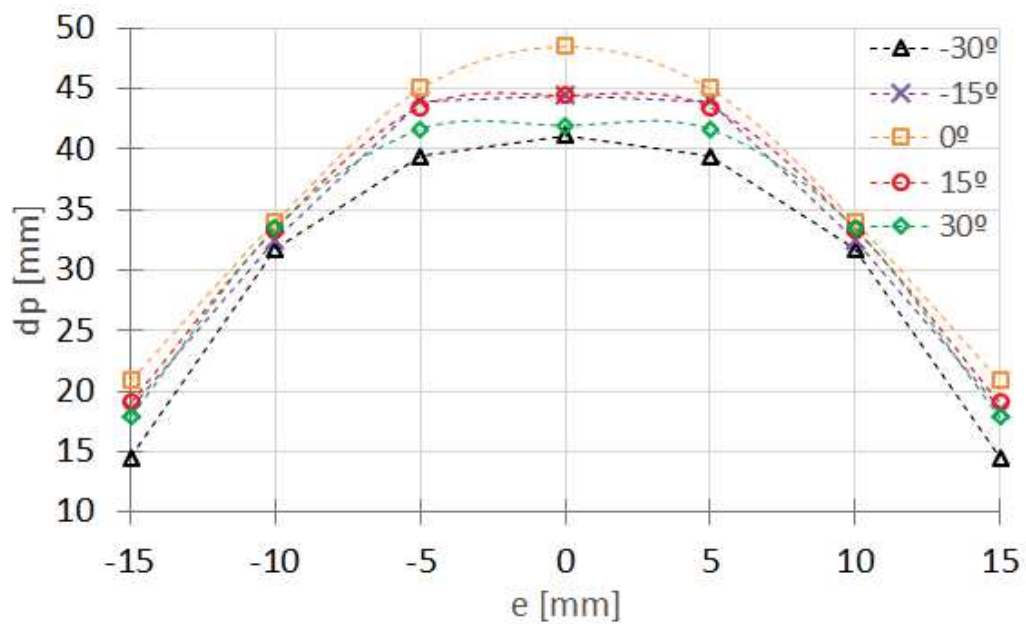


Figura 44: Relação entre a distância de intersecção da curva de corrente relativa e deslocamento lateral  $e$  para diferentes valores de  $\theta$ . A bobina percorre uma trajetória 20 mm distante da bobina implantável.

apresenta variações. Da mesma forma que quando aplicado à determinação da posição, esta faixa é simétrica ao ângulo  $\theta$  igual a zero.



### 5.0.3 MÉTODO PARA ESTIMAÇÃO DA POSIÇÃO DA BOBINA IMPLANTÁVEL

Nesta seção é proposto o método para determinar a posição e orientação relativa da bobina implantável por meio do monitoramento da corrente no primário. Este é composto por quatro etapas:

#### 1. Definição da região de busca

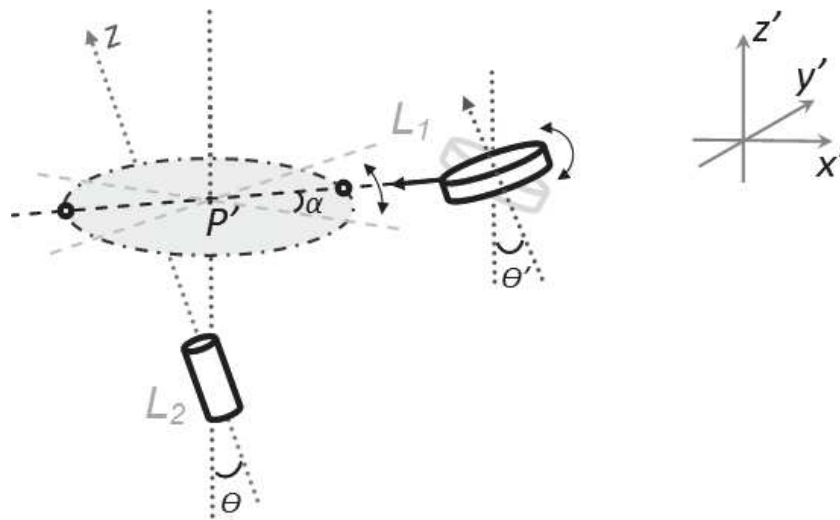
O primeiro passo é a definição do nível de corrente que será monitorado e a região em que se aplicará os procedimentos. Para isso, deve-se aproximar a bobina externa da suposta região em que há uma bobina implantada e movimentá-la até encontrar uma variação na corrente do primário, indicando que a primeira bobina passou pela região de influência da segunda acoplando-as magneticamente. A partir desta coordenada altera-se o posicionamento lateral e percorre-se uma trajetória retilínea até obter dois pontos em uma mesma reta cuja corrente chegue ao nível desejado. A partir desta coordenada define-se o eixo  $x'$  e  $y'$ .

#### 2. Ajuste do desalinhamento lateral

Localizada a coordenada inicial para aplicação dos próximos procedimentos percorre-se uma trajetória retilínea paralela ao eixo  $x'$  variando a posição de  $y'$  até obter um máximo  $d_p$ . Este primeiro ajuste corrige a coordenada  $y'$  para uma situação mais próxima de um desalinhamento lateral nulo (ver figura 45). O mesmo procedimento deve ser repetido para ajustar a coordenada  $x'$ . Ao final desta etapa, a intersecção dos dois maiores segmentos de reta corresponderá ao ponto  $P'$ . Neste ponto, a bobina externa esta orientada para a bobina implantada, porém, desalinhamentos laterais ainda podem existir.

#### 3. Ajuste do desalinhamento angular

Nesta etapa, define-se uma trajetória retilínea que passe pelo ponto  $P'(0,0,z')$  e deve-se percorre-la alterando o ângulo da bobina transmissora com relação ao seu centro até obter máximo  $d_p$ , tanto para determinar o sentido (o ângulo  $\alpha$  formado entre os eixos  $x$  e  $x'$ ) do desalinhamento angular quanto para corrigi-lo. Vale ressaltar que neste procedimento deve-se prestar atenção ao ajuste da bobina a uma distância  $c$  apropriada para que altere  $\theta'$  sem que a bobina encoste na superfície limite, no caso, a pele. Esta situação implica em uma relação de compromisso entre a distância  $z'$  necessária para aplicar o método e a amplitude de testes do ângulo. Ao fim desta etapa obtém-se o ângulo relativo da bobina implantada.



**Figura 45: Ilustração do procedimento para ajuste do desalinhamento angular.**

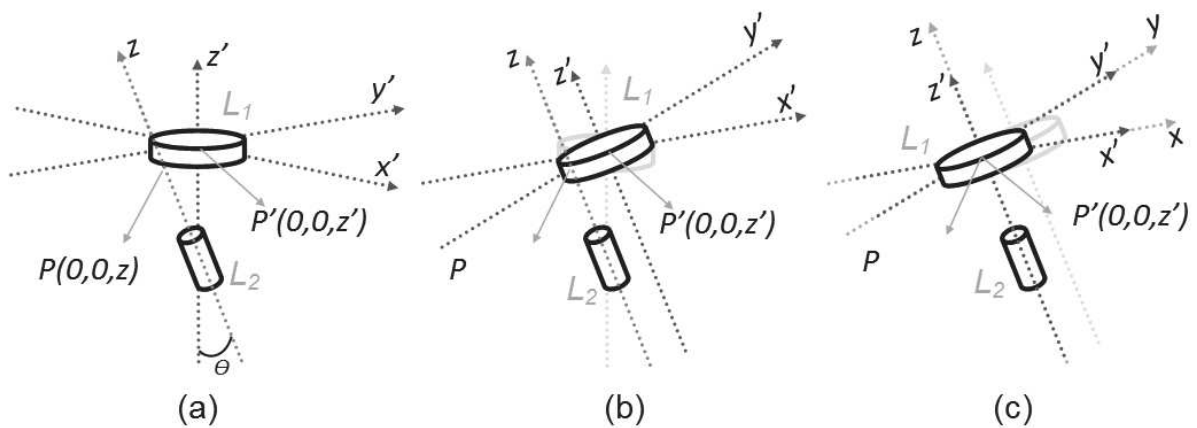
#### 4. Ajuste do eixo $z'$

A figura 46 mostra a configuração necessária para o correto posicionamento da bobina externa tão perto quanto possível de uma situação alinhada. Note que após a definição de  $P'$  (figura 46(a)) e o posterior ajuste do desalinhamento angular, o eixo  $z'$  está paralelo ao eixo  $z$  mas não coincidem (figura 46(b)). Portanto, é necessário aplicar novamente o procedimento para ajustar o eixo  $z$  encontrando o ponto  $P$  (figura 46(c)). Para isso, pode-se repetir o passo 2) ou tomar vantagem da característica circular da curva quando a bobina esta próxima de um desalinhamento angular nulo.

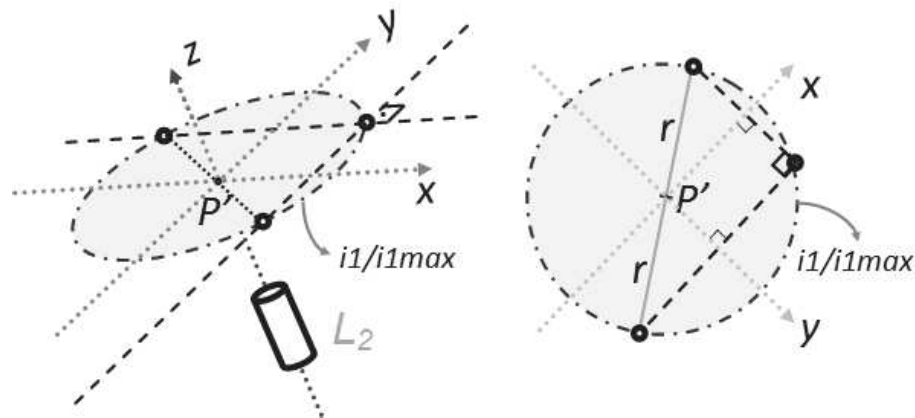
A figura 47 mostra a segunda abordagem que pode ser utilizada para definir o ponto  $P$ . Desloca-se a bobina externa para obter um ponto no qual a corrente relativa alcance o nível desejado. Este ponto deve ser fixado e tomando-o como ponto inicial deve-se percorrer duas trajetórias perpendiculares criando dois segmentos de reta. Assumindo um círculo perfeito formado por esses dois segmentos, a hipotenusa corresponde ao diâmetro do círculo e por isso o seu valor médio determina a nova posição  $P'$  que coincide com o ponto  $P$ .

### 5.1 AVALIAÇÃO DA PRECISÃO E EXATIDÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Ao final da execução do método, a posição e orientação determinadas podem apresentar desvios, como mostra a figura 48(a). Para determinar o desvio lateral, deve-se considerar a bobina alinhada angularmente de forma que o plano  $x'y'$  esteja paralelo ao plano  $xy$ , como mostra a figura 48(b). Desta forma, por meio das coordenada  $x'$  e  $y'$  do ponto  $P'$  é possível



**Figura 46:** Situações ao qual foram aplicados (a) ajuste no desalinhamento lateral e (b) ajuste no desalinhamento angular.



**Figura 47:** Ilustração do procedimento para ajuste do eixo  $z'$ .

calcular o desvio lateral fazendo  $e_{x,y} = \sqrt{(x')^2 + (y')^2}$ , ou seja, a distância entre os eixos  $z$  e  $z'$ . A figura 48(c) ilustra os planos  $xy$  e  $x'y'$  paralelos um ao outro e o desvio  $e_{x,y}$ .

Já para a determinação do desvio angular, deve-se projetar a bobina  $L_1$  no ponto  $P$  eliminando o desalinhamento lateral e, assim, observar o ângulo  $\theta'$  formado pelos eixos  $z$  e  $z'$  (*i.e.*, o ângulo formado pelos planos  $x'y'$  e  $xy$ , como mostra a figura 49(a)). Além disso, o sentido do desalinhamento angular também pode apresentar desvios, ou seja, os eixos  $x'$  e  $y'$  podem estar rotacionados formando o ângulo  $\alpha$  em relação aos eixos  $x$  e  $y$ . A figura 49(b) ilustra o plano  $xy$  e a presença do desvio entre os eixos  $x$  e  $x'$ . Devido à característica simétrica das bobinas circulares, em uma situação de alinhamento lateral o desvio  $\alpha$  não influencia o comportamento do coeficiente de acoplamento, porém, à medida que se aumenta o desvio lateral torna-se interessante considerá-lo e dimensioná-lo.

Para realizar uma primeira avaliação da precisão e exatidão do método proposto,

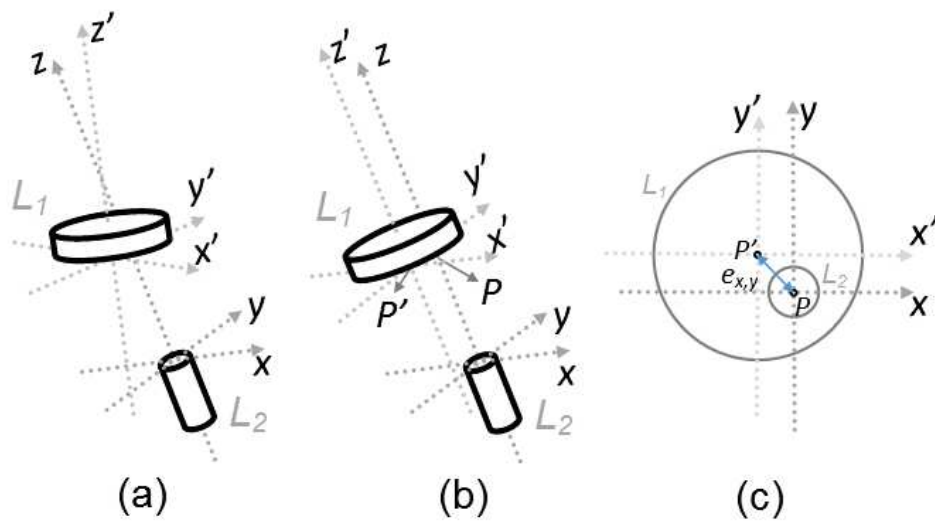


Figura 48: Ilustração do (a) posicionamento relativo das bobinas levando em consideração os possíveis desvios do método. (b) Ajuste do ângulo relativo para definição do desvio lateral  $e_{x,y}$  e (c) vista do plano  $xy$  e o desvio  $e_{x,y}$ .

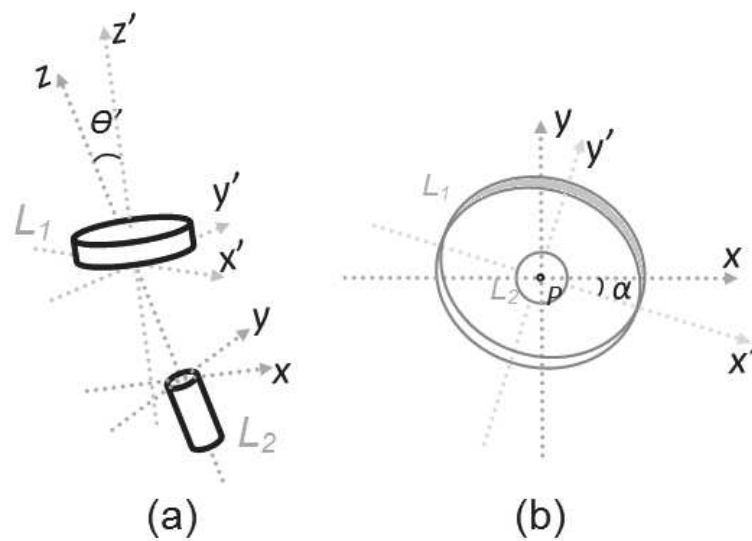


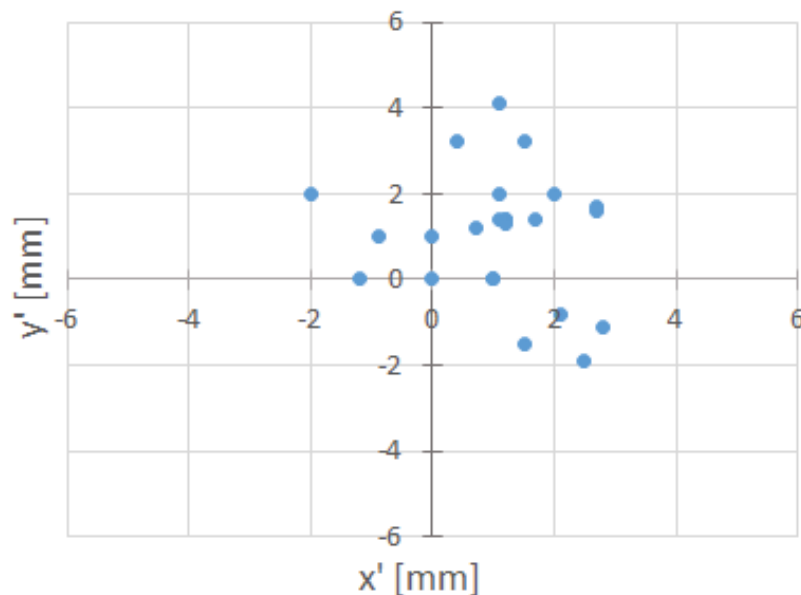
Figura 49: (a) Definição do desvio angular  $\theta'$  e (b) a ocorrência de uma variação na rotação do eixo  $x'$  em relação a  $x$ .

simulou-se os procedimentos descritos anteriormente em *Matlab*. Para a execução dos testes virtuais utilizou-se das curvas de ajuste dos pontos experimentais e fixou-se pontos aleatórios no espaço para o início dos procedimentos e assim se aproximar de uma situação real cuja posição e orientação são totalmente desconhecidas.

Optou-se por utilizar um algoritmo de busca da máxima distância  $d_p$  especificando um passo fixo para os deslocamentos laterais e angulares. Parte-se de um posicionamento inicial aleatório e compara-se os valores de  $d_p$  até que o valor anterior seja maior que o valor atual. Quando há várias iterações em que a distância máxima se repete, realiza-se a média aritmética da primeira ocorrência e da última ocorrência para então determinar a posição ou o ângulo relativo.

Por exemplo, considerando-se um dispositivo que varia sua posição lateral em passos de 5 mm (resolução lateral) e sua angulação em passos de  $15^\circ$  (resolução angular) aplicou-se o teste virtual para uma bobina implantada desalinhada  $30^\circ$  e distante 20 mm da bobina externa. Como resultado, determinou-se a posição da bobina implantada com um desvio de 3,1 mm. O desvio do ângulo relativo foi de  $-5^\circ$ , portanto, em relação à pele, a bobina estaria  $25^\circ$  inclinada. Avaliando o sentido deste desalinhamento verificou-se um desvio  $\alpha$  de  $5^\circ$ .

A figura 50 apresenta os pontos  $x'$  e  $y'$  determinados aplicando o método proposto para uma bobina implantada desalinhada  $30^\circ$  e distante 15 mm da bobina externa. Considerou-se um dispositivo que realiza a busca da máxima distância  $d_p$  com uma resolução lateral de 5 mm e resolução angular de  $15^\circ$ , além de uma sensibilidade de 1 mm na detecção da distância entre os pontos que cruzam a superfície do parabolóide para uma  $i_1/i_{1max}$  de 90 %.



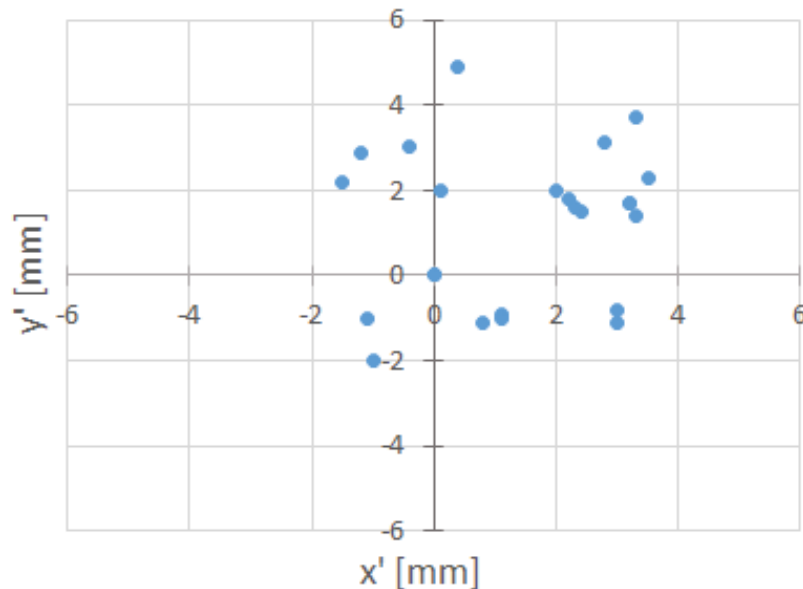
**Figura 50: Posições determinadas pela aplicação do método considerando um dispositivo com resolução lateral de 5 mm.**

Analisando os pontos coletados e seus respectivos erros, observou-se que os valores obtidos no teste virtual circundam o centro da bobina  $L_2$  (i.e.  $P(0,0,z)$ ). O erro médio foi de 2,1 mm que representa um erro médio percentual de 38 % e 5 % se comparado ao diâmetro das

bobinas  $L_2$  de 5,5 mm e  $L_1$  de 40 mm, respectivamente. Verificou-se uma incerteza padrão de 1,0 mm e mesmo considerando  $e_{x,y}$  máximo de 4,24 mm, a bobina  $L_2$  permanece totalmente englobada por  $L_1$ . Estas características indicam uma exatidão adequada para definição da posição relativa.

Para a determinação do ângulo relativo verificou-se uma incerteza padrão de  $9,6^\circ$  e um erro médio de  $\theta'$  de  $7,8^\circ$ . Se avaliado este erro em relação ao intervalo testado ( $-30^\circ$  a  $30^\circ$ ) observa-se um erro médio percentual de 13 %. Vale ressaltar que para a realização das simulações do desalinhamento angular foi necessário limitar os testes de acordo com as curvas de ajuste disponíveis. Já para o dimensionamento do desvio do eixo  $x'$  verificou-se um erro médio de  $7,0^\circ$  e uma incerteza padrão de  $7,7^\circ$ . Considerando o máximo desvio possível ( $\alpha = 180^\circ$ ), o método apresentou um erro médio percentual de 4 %.

Seguindo as mesmas especificações de resolução e sensibilidade, a figura 51 apresenta as coordenadas  $x'$  e  $y'$  dos pontos determinados aplicando o método proposto para uma bobina implantada desalinhada  $15^\circ$  e distante 15 mm da bobina externa. Para a determinação do desvio lateral verificou-se um incerteza padrão igual a 1,3 mm e um erro médio de 2,6 mm. Para a determinação do ângulo relativo verificou-se um incerteza padrão de  $7,1^\circ$  e um erro médio de  $\theta'$  de  $5,6^\circ$  enquanto que  $\alpha$  apresentou um erro médio de  $4,9^\circ$  e incerteza padrão de  $5,1^\circ$ .



**Figura 51: Posições determinadas pela aplicação do método considerando um dispositivo com resolução lateral de 5 mm,  $\theta = 15^\circ$  e 15 mm de distância entre as bobinas.**

Nas primeiras avaliações da distância  $d_p$  para variações de ângulo e distância lateral foi observado uma faixa expressiva em que não há sensibilidade adequada da distância  $d_p$  frente ao desalinhamento lateral ( $-5$  a  $5$  mm) e desalinhamento angular ( $-15^\circ$  a  $15^\circ$ ). Entretanto, por

meio da simulação do método, e do algoritmo utilizado para busca de  $d_p$  máximo, verificou-se uma incerteza menor.

Basicamente, o método proposto baseia-se na busca da distância  $d_p$  máxima, porém, na prática, determinar esta distância depende tanto da resolução do dispositivo quanto da posição em que se iniciou a aquisição dos dados, e ambas características estão associadas com o número de iterações necessárias para aplicação do método.

Por exemplo, para as resoluções laterais e angulares utilizadas no teste virtual obtém-se uma média de 27 iterações, já quando aplicados os mesmos testes para uma resolução lateral de 10 mm e angular de 20° a média de iterações cai para 24. Todavia, reduzir a resolução lateral pode implicar em um aumento do desvio na determinação da posição relativa da bobina. A mesma característica é presente na definição da resolução angular do método.

Outro fator relacionado ao número de iterações necessárias e na exatidão do método é o algoritmo de busca da máxima distância  $d_p$ . A esta altura testou-se o método utilizando apenas um algoritmo, porém, é interessante testar outros tipos de algoritmos para busca da distância máxima. Por exemplo, pode-se utilizar um algoritmo que inicia com passos laterais e angulares elevados e à medida que se aumenta as iterações reduz-se o passo de forma a convergir para o valor máximo de  $d_p$  e, além disso, aproveitando-se da simetria da influência lateral e angular sobre  $d_p$ , calcular o valor médio das últimas iterações. Ao definir um algoritmo ótimo para aplicação dos procedimentos espera-se uma redução das iterações necessárias e em uma maior precisão/exatidão do método.

De fato, o processo de otimização do método é dependente da relação compromisso entre o número de iterações e a exatidão do método. À medida que se reduz o número de iterações, e assim obtém-se um procedimento total mais rápido, também reduz-se a exatidão na determinação da posição e orientação relativa das bobinas.

Com o desenvolvimento e estudo das características do enlace, e posteriormente do método proposto, observou-se que a determinação do posicionamento relativo da bobina implantada está relacionada com diversas variáveis e que distinguir a influência de cada uma sobre o posicionamento final não é uma tarefa simples. Espera-se que com o desenvolvimento de um dispositivo para automatizar os procedimentos obtenha-se precisão e exatidão próximas das avaliadas no teste virtual bem como um fundamental auxílio em uma posterior otimização do método.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho investigou o comportamento de um sistema de *WPT* frente a desalinhamentos laterais e angulares. Por meio da relação entre o nível de corrente no primário e o seu valor máximo que pode ser alcançado, avaliou-se uma abordagem para determinação da posição e orientação relativa de bobinas implantáveis.

Neste sentido, estudou-se características elétricas de um sistema de *WPT* e quais as situações de desalinhamentos presentes em um enlace indutivo formado por duas bobinas. Avaliando-se matematicamente o circuito equivalente formado pelo acoplamento magnético do primário e secundário deduziu-se a expressão da  $i_1/i_{1max}$ , verificando que é possível determinar uma relação entre o nível de acoplamento magnético e o posicionamento relativo das bobinas apenas mensurando a corrente no primário.

A investigação da influência de desalinhamentos sobre a *WPT* possibilitou determinar um padrão de comportamento da relação entre a distância  $c$  e  $d$  para que seja possível alcançar um determinado nível de acoplamento, que no caso foi modulado pela corrente no primário. De fato, há diversos posicionamentos (no espaço tridimensional em que estão contidas as bobinas) em que o  $k$  atinge o mesmo valor.

Para os casos estudados, tanto em um enlace de médias dimensões (projetado nos estudos preliminares) quanto em um enlace crítico com dimensões da bobina do secundário reduzidas, observou-se um comportamento parabólico destes posicionamentos quando a orientação é constante. Para um caso de desalinhamento angular nulo, o  $k$  desejado segue um parabolóide cuja distância  $c$  máxima é obtida para um desalinhamento lateral também nulo (i.e.,  $d = 0$  mm e  $e = 0$  mm).

Todavia, ao mudar a orientação relativa das bobinas, este parabolóide sofre um pequeno deslocamento no sentido da orientação da bobina no secundário. A distância  $c$  máxima, portanto, ocorre em uma posição  $d$  diferente de 0 mm. Desta forma, ao mudar a orientação da bobina, a distância  $c$  máxima para que atinja o acoplamento desejado não é necessariamente em uma condição de alinhamento.



A partir do comportamento observado, testou-se a hipótese de que ao percorrer uma reta com a bobina transmissora e esta estiver próxima o suficiente da bobina implantada, são detectados dois pontos da curva cuja corrente no primário alcança o nível desejado. De fato, esta hipótese se mostrou válida, e através da distância  $d_p$  formada por estes dois pontos pode-se determinar sua relação com desalinhamentos laterais e angulares, viabilizando a elaboração de procedimentos para corrigi-los.

Por meio de simulações, foi possível verificar o nível de precisão/exatidão do método especificando um posicionamento aleatório no espaço e aplicando os procedimentos. O erro médio e a incerteza padrão na determinação da posição relativa foram em torno de 2,4 mm e 1,1 mm, respectivamente, que se comparada às dimensões das bobinas indica uma exatidão adequada. Para a determinação do ângulo relativo o método também apresentou resultados promissores, uma vez que o erro médio foi de  $7^\circ$  e a incerteza padrão obtida de  $8,2^\circ$ .

Portanto, a nova abordagem estudada neste trabalho possibilita o desenvolvimento de equipamentos para determinação da posição e orientação relativa de uma bobina implantável mensurando apenas a corrente no primário, sem a necessidade de circuitos adicionais no *IMD* ou a utilização de equipamentos de imagem médicos.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista as características observadas frente a diferentes situações de posicionamento entre as bobinas, além dos testes de princípio realizados para uma avaliação preliminar da exatidão e precisão do método proposto. Verificou-se que a determinação da posição e orientação relativa da bobina apenas por meio da corrente no primário esta relacionada com diversas variáveis.

A aplicação dos procedimentos depende da relação apropriada entre a posição da bobina implantada e a distância em que se detecta uma variação da corrente no primário. No caso, esta limitação está relacionada com características físicas e elétricas do enlace. Além disso, as características do algoritmo para detecção da máxima distância  $d_p$ , sensibilidade do dispositivo e número de iterações totais para aplicação do método estão relacionadas com a precisão e exatidão do mesmo.

Por isso, é interessante o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para automatização dos procedimentos propostos para *WPT* a duas bobinas. Desta forma, espera-se em trabalhos futuros verificar com mais clareza a relação compromisso entre o número de iterações e a qualidade do método e, assim, auxiliar na otimização do método.

Outra proposta interessante é o estudo do método aplicado a sistemas de *WPT* com mais de duas bobinas (três e quatro principalmente), uma vez que estes sistemas são muito estudados na literatura e possuem características promissoras para aplicação em dispositivos implantáveis. Além disso, estudos mais pontuais podem ser realizados com bobinas de diferentes formatos e dimensões, dentre outras variações e situações que podem ser avaliadas em conjunto à aplicação do método.

## REFERÊNCIAS

- ABATTI, P. J. P. J.; PICHORIM, F.; MIRANDA, C. M. Maximum power transfer versus efficiency in mid-range wireless power transfer system. **Journal of Microwave, Optoelectronics and Electromagnetic Application**, v. 14, n. 1, p. 97–109, 2015.
- ARTAN, N. S. et al. A high-performance transcutaneous battery charger for medical implants. In: **Proceedings of the IEEE EMBS 2010**. Buenos Aires, Argentina: [s.n.], 2010. p. 1581–1584.
- BABIC, S. I.; AKYEL, C. Calculating mutual inductance between circular coils with inclined axes in air. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 44, n. 7, p. 1743–1750, 2008.
- BAKER, M. W.; SARPESHKAR, R. Feedback analysis and design of rf power links for low-power bionic systems. **IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems**, v. 1, p. 28 – 38, 2007.
- CAMPI, T. et al. Wireless power transfer charging system for aimds and pacemakers. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 64, n. 2, p. 633–642, Feb. 2016. 2016.
- DONALDSON, N. de N.; PERKINS, T. A. Analysis of resonant coupled coils in the design of radio frequency transcutaneous links. **Journal of Medical and Biological Engineering and Computing**, v. 21, n. 5, p. 612–627, September 1983.
- GREATBATCH, W.; HOLMES, C. F. History of implantable devices. **IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine**, p. 38–49, 1991.
- GUO, X.; SONG, C.; YAN, R. Optimization of multilayer cylindrical coils in a wireless localization system to track a capsule-shaped micro-device. **Elsevier Measurement**, v. 46, p. 117–124, 2013.
- HASHI, S. et al. Wireless magnetic position-sensing system using optimized pickup coils for higher accuracy. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 47, n. 10, p. 3542–3545, 2011.
- HU, Y.; SAWAN, M. A fully integrated low-power bpsk demodulator for implantable medical devices. **IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS - I: REGULAR PAPERS**, v. 52, n. 12, p. 2552–2562, 2005.
- HUI, S.; ZHONG, W.; LEE., C. A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 29, n. 9, p. 4500–4511, 2014.
- JEUTTER, D. C. A transcutaneous implanted battery recharging and biometer power switching system. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, BME-29, n. 5, p. 314–321, 1982.
- JOUNG, Y.-H. Development of implantable medical devices: From an engineering perspective. **International Neurology Journal**, v. 17, p. 98–106, 2013.

JOW, U.-M.; GHOVANLOO, M. Design and optimization of printed spiral coils for efficient transcutaneous inductive power transmission. **IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems**, v. 1, n. 3, p. 193–202, September 2007.

KAINI, M.; JOW, U.-M.; GHOVANLOO, M. Design and optimization of a 3-coin inductive link for efficient wireless power transmission. **IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems**, v. 5, p. 579 – 591, 2011.

KAZUMOTO, Y.; SUGIMOTO, C.; KOHNO, R. Study on position estimation of implanted devices by using signal processing for uwb ground penetrating radar. In: **6th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)**. [S.l.: s.n.], 2012.

KHAN, U. I.; PAHLAVAN, K.; MAKAROV, S. Comparison of toa and rss based techniques for rf localization inside human tissue. In: **IEEE/EMBS**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 5602 – 5607.

KO, W. H.; P, L. S.; FUNG, C. D. F. Design of radio-frequency powered coils for implant instruments. **Medical & Biological Engineering & Computing**, v. 15, p. 634–640, Nov. 1977.

LIM, H. G. et al. Implementation of a transcutaneous charger for fully implantable middle ear hearing device. In: **Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology**. Shanghai, China: [s.n.], 2005. p. 6813–6816.

MITCHESON, P. Energy harvesting for human wearable and implantable bio-sensors. In: **Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 3432–6.

NEBEKER, F. **Golden Accomplishments in Biomedical Engineering**. 2002.

PICHORIM, S. F.; ABATTI, P. J. Design of coils for millimeter and submillimeter-sized biotelemetry. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 51, n. 8, p. 1487–1489, Aug. 2004.

POURHOMAYOUN, M.; FOWLER, M.; JIN, Z. A novel method for medical implant in-body localization. In: **Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 5757 – 5760.

PRUTCHI, D. **Tantalus II System for Treating Metabolic Syndrome**. 2011. Acesso em: 12 mar 2014. Disponível em: <<http://www.implantable-device.com/2011/12/13/tantalus-ii-system-for-treating-metabolic-syndrome/>>.

RAMRAKHYANI, A. K. et al. Design and optimization of resonance-based efficient wireless power delivery systems for biomedical implants. **IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems**, v. 5, n. 1, p. 48–63, February 2011.

RAO, S. et al. Wireless gastric stimulators. In: **Symposium on Wireless and Microwave Circuits and Systems (WMCS)**,. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–4.

SALAM, M. T.; NGUYEN, D. K.; SAWAN, M. A low-power implantable device for epileptic seizure detection and neurostimulation. In: **Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 154–157.

SODAGAR, A. M. Implantable biomedical microsystems: A new graduate course in biomedical circuits and systems. **IEEE Transactions on Education**, v. 57, n. 1, p. 48–53, 2014.

SOMA, M.; GALBRAITH, D. C.; WHITE, R. L. Radio-frequency coils in implantable devices: misalignment analysis and design procedure. **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, BME-34, n. 4, p. 265–275, Apr. 1987.

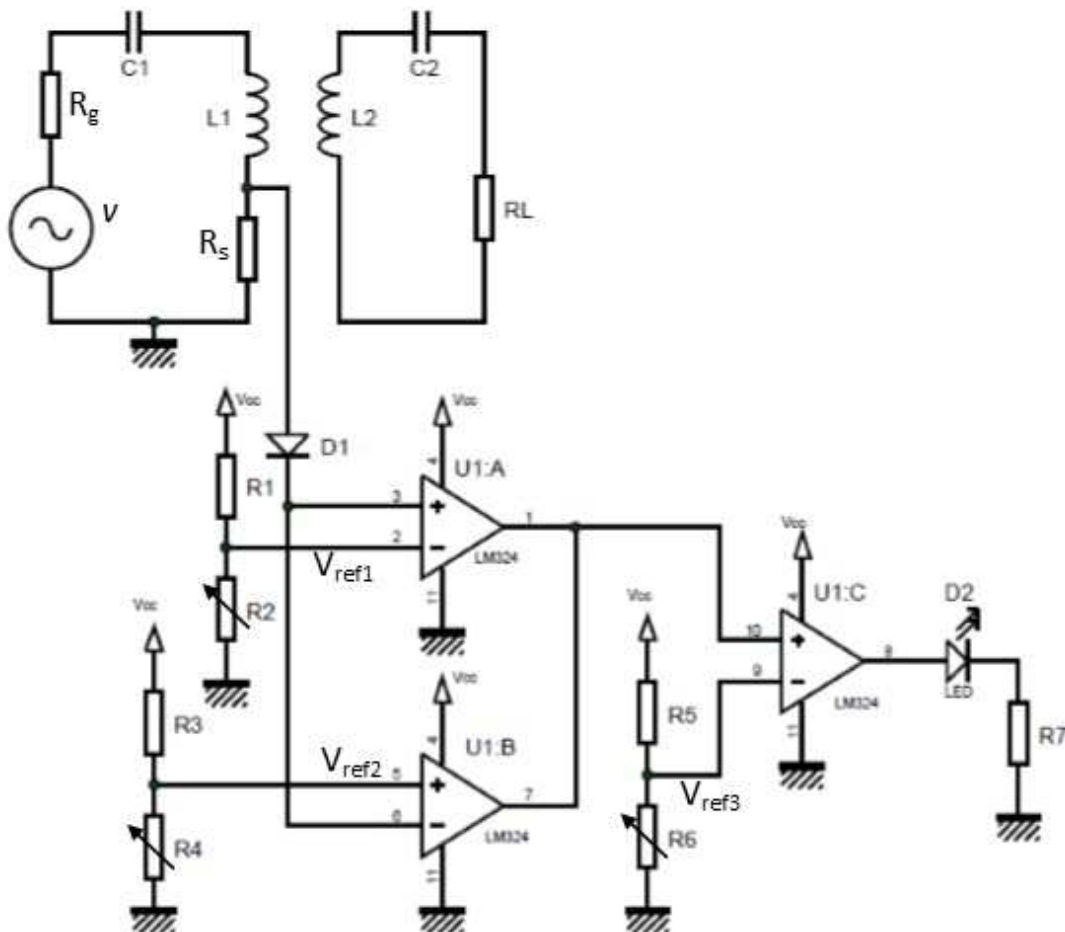
ZENG, F.-G. et al. Cochlear implants: System design, integration, and evaluation. **IEEE Reviews in Biomedical Engineering**, v. 1, p. 115–142, 2008.

ZIERHOFER, C. M.; HOCHMAIR, E. S. Geometric approach for coupling enhancement of magnetically coupled coils. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 43, n. 7, p. 708–714, July 1996.

ZOU, Y.; O'DRISCOLL, S. Implant position estimation via wireless power link. **IEEE Transactions on Circuits and Systems - II Express Briefs**, v. 62, n. 2, p. 139–143, Feb. 2015.

## APÊNDICE A – CIRCUITO PARA AQUISIÇÃO DOS PONTOS EXPERIMENTAIS

Para a detecção da corrente no primário no nível desejado, montou-se um comparador de janela mostrado na figura 52. Utilizando de um amplificador operacional LM324 alimentado com uma fonte de alimentação simples ajustada em 5 V, realiza-se a aquisição do nível de tensão sobre o resistor de prova conectado em série ao sistema de *WPT*.



**Figura 52:** Circuito para aquisição dos pontos experimentais de acordo com o nível de corrente desejado.

Devido a alta impedância de entrada do amplificador operacional, o circuito de aquisição não influencia no sistema de *WPT* e retificando através do diodo D1 compara-se o nível de

tensão com os valores de referência  $V_{ref1}$  e  $V_{ref2}$  provenientes dos divisores de tensão. O nó  $V_{ref1}$  foi conectado a um comparador não inversor, enquanto  $V_{ref2}$  a um comparador inversor. As saídas destes dois comparadores são conectadas a entrada de um terceiro comparador não inversor que é responsável por acionar o LED D2 que indica visualmente que a corrente no circuito alcançou o nível desejado.

Para obter um bom ajuste na comparação dos sinais, utilizou-se potenciômetros com multivoltas para as resistências  $R2$ ,  $R4$  e  $R6$ . Desta forma, é possível alterar o posicionamento relativo das bobinas que compõem o enlace e verificar quais posições no espaço tridimensional a corrente no primário alcançou o nível ajustado.