

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELÉTRICA**

KAROLINE AKEMI SATO

**PROTÓTIPO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO
EM BAIXA TENSÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015

KAROLINE AKEMI SATO

**PROTÓTIPO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO
EM BAIXA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Eletricista, do Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento de Engenharia Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Karoline Akemi Sato

Protótipo de transmissão de energia elétrica sem fio em baixa tensão

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14:30hs do dia 18/11/2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Luiz Marcelo Chieese da Silva - (Membro)

Prof(a). Me(a). Jancer Frank Zanini Destro - (Membro)

Dedico este trabalho à minha família,
aos alunos e amigos,
ao corpo docente da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná -
câmpus Cornélio Procópio,
de modo especial àqueles que
participaram efetivamente da minha
formação pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida, proteção e direção.
Sem Ele nada seria possível!

Aos meus pais, por seus exemplos e ensinamentos
e pelos valiosos incentivos aos estudos.

À minha irmã, "*my little sister*".

A todos os colegas e amigos da UTFPR, em especial:
à Amanda Spagolla e à Bruna Fortunato, por toda ajuda vinda do CIPECA
(Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação);
ao Luiz Yamashita Barbosa, por todas as ferramentas, equipamentos e materiais
emprestados no decorrer do curso.

À minha amiga Alessandra Harumi Lopes Kikuchi,
por todos os momentos descontraídos que inventamos na UTFPR.
Continue a ser essa pessoa meiga que você é, Harumi-chan!

Ao meu amigo Caio Gerwandsznajder Nunes Silva,
meu grande companheiro de equipe,
por sua tranquilidade e paciência nas mais diversas circunstâncias
e por todo apoio e ajuda.
Inesquecíveis também as situações engraçadas que você proporciona, Caio!

A todos os professores da UTFPR,
em especial ao professor orientador Marco Antonio Ferreira Finocchio,
por todo auxílio, atenção e dedicação para a orientação deste trabalho.

Enfim, a todos que, de alguma forma,
colaboraram para a execução desta monografia.

"*The essential is invisible to the eye.*"

"O essencial é invisível aos olhos."

The Little Prince
O Pequeno Príncipe

(filme: realização de Mark Osborne, 2015)

(livro: tradução do livro original de Antoine de Saint Exupéry, 1943)

RESUMO

SATO, Karoline Akemi. Protótipo de transmissão de energia elétrica sem fio em baixa tensão. 2015. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

É evidente o aumento na variedade de produtos que necessitam de eletricidade para funcionar. Com isso, porém, há também um grande aumento de fios e cabos distribuídos por uma instalação elétrica. Nesse sentido, este trabalho aborda um tema futurístico: a possibilidade da utilização da transmissão de energia sem fio (ou, do inglês, *Witricity* – que se refere a eletricidade sem fio) para eliminar fios e cabos em excesso nos circuitos. Assim, se reduz também os riscos de acidentes devido a choques elétricos, ocasionados por fios/cabos desencapados, ou, simplesmente, pelo fato de estarem espalhados pelo caminho, reduzindo-se também a poluição visual e melhorando-se a estética do ambiente. Foi estudado e construído um protótipo de transmissão de energia elétrica sem fio, registrando-se a distância observada entre as bobinas com o intuito de se obter uma boa conectividade sem fio de acordo com seus respectivos diâmetros. Além disso, com o auxílio de simulações computacionais, comprovou-se a possibilidade de se estabelecer tensão e corrente entre dois circuitos, proporcionando o valor necessário na saída do circuito de maneira sem fio, variando-se apenas a posição relativa entre as bobinas, seus diâmetros e a frequência do circuito primário (circuito conectado à rede elétrica).

Palavras-chave: Bobinas. Eletricidade sem fio. Indutância. Transmissão de energia sem fio. *Witricity*.

ABSTRACT

SATO, Karoline Akemi. Electric wireless power transmission prototype in low voltage. 2015. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

It's clear the increase in the variety of products that require electricity to operate. Because of this, however, there is also a large increase in wires and cables spread over an electrical installation. In this sense, this work deals with a futuristic subject: the possibility of using wireless power transmission (WiTricity, in English, which refers to wireless electricity) to eliminate excess wires and cables in the circuits. Thus, it also reduces the risk of accidents due to electric shock caused by bare wires/cables or just because they are scattered along the way, besides reducing the visual pollution and improving up the aesthetics of the environment. It has been studied and built a wireless power transmission prototype, registering the distance observed between the coils in order to obtain a good wireless connectivity according to their respective diameters. Moreover, with the aid of computer simulations, it has proven possible to establish the voltage and current between two circuits, providing the required value at the output of wireless circuit, varying only the relative position between the coils, their diameters and the frequency of the primary circuit (circuit connected to the power supply).

Keywords: Coils. Wireless electricity. Inductance. Wireless power transmission. WiTricity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Protótipo do MIT para iluminar uma lâmpada de 60 W.	20
Figura 2 – Protótipo da Intel para iluminar uma lâmpada.	20
Figura 3 – Carregador de celular wireless.	21
Figura 4 – Esquema representativo do acoplamento indutivo ressonante.	22
Figura 5 – Fluxo de campo magnético através de uma superfície plana de área A.	25
Figura 6 – Bobinas.	27
Figura 7 – Três situações diferentes de acoplamento magnético: (a) nulo, (b) médio, (c) máximo.	27
Figura 8 – Circuitos acoplados magneticamente.	28
Figura 9 – Indutância mútua M_{21} da bobina 2 em relação a bobina 1.	29
Figura 10 – Indutância mútua M_{12} da bobina 1 em relação a bobina 2.	29
Figura 11 – Enrolamento: (a) levemente acoplado; (b) fortemente acoplado.	30
Figura 12 – Estrutura básica de um transmissor de energia elétrica sem fio.	33
Figura 13 – Produção de um elemento de campo magnético dB no ponto P	34
Figura 14 – Circuito esquemático do transmissor de energia sem fio.	36
Figura 15 – Arranjo típico de um Sistema de Transferência de Potência acoplado indutivamente.	37
Figura 16 – Bobinas primárias e transmissor de energia sem fio.	39
Figura 17 – Bobinas secundárias.	40
Figura 18 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 1, com luminosidade máxima.	41
Figura 19 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 1, com luminosidade baixa.	42
Figura 20 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 2, com luminosidade máxima.	43

Figura 21 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 2, com luminosidade mínima.	43
Figura 22 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 3, com luminosidade máxima.....	44
Figura 23 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 3, com luminosidade mínima.	44
Figura 24 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 4, com luminosidade máxima.....	45
Figura 25 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 4, com luminosidade mínima.	45
Figura 26 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 5, com luminosidade máxima.....	46
Figura 27 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 5, com luminosidade baixa.....	46
Figura 28 – Bobina primária de fio branco na situação 1, com luminosidade máxima.....	48
Figura 29 – Bobina primária de fio branco na situação 1, com luminosidade baixa.....	48
Figura 30 – Bobina primária de fio branco na situação 2, com luminosidade máxima.....	49
Figura 31 – Bobina primária de fio branco na situação 2, com luminosidade mínima.	49
Figura 32 – Bobina primária de fio branco na situação 3, com luminosidade máxima.....	50
Figura 33 – Bobina primária de fio branco na situação 3, com luminosidade mínima.	50
Figura 34 – Bobina primária de fio branco na situação 4, com luminosidade máxima.....	51
Figura 35 – Bobina primária de fio branco na situação 4, com luminosidade mínima.	52
Figura 36 – Bobina primária de fio branco na situação 5, com luminosidade máxima.....	52
Figura 37 – Bobina primária de fio branco na situação 5, com luminosidade baixa.....	53

Figura 38 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 1, com luminosidade máxima.....	54
Figura 39 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 1, com luminosidade mínima.	54
Figura 40 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 2, com luminosidade máxima.....	55
Figura 41 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 2, com luminosidade mínima.	56
Figura 42 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 3, com luminosidade máxima.....	56
Figura 43 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 3, com luminosidade mínima.	57
Figura 44 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 4, com luminosidade máxima.....	58
Figura 45 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 4, com luminosidade mínima.	58
Figura 46 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 5, com luminosidade máxima.....	59
Figura 47 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 5, com luminosidade mínima.	59
Figura 48 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 1, com luminosidade máxima.....	60
Figura 49 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 1, com luminosidade baixa.....	61
Figura 50 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 2, com luminosidade média.	61
Figura 51 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 3, com luminosidade máxima.....	62
Figura 52 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 3, com luminosidade mínima.	63
Figura 53 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 4, com luminosidade máxima.....	63
Figura 54 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 4, com luminosidade mínima.	64

Figura 55 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 5, com luminosidade máxima.....	64
Figura 56 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 5, com luminosidade baixa.....	65
Figura 57 – Circuito analisado em simulação.....	66
Figura 58 – Circuito analisado em simulação, mostrando onde foram feitas as medições de tensão e corrente.	67
Figura 59 – Circuito analisado em simulação com coeficiente de acoplamento $k=0,000439$	68
Figura 60 – Circuito analisado em simulação com coeficiente de acoplamento $k=0,0019$	70
Figura 61 – Circuito analisado em simulação com coeficiente de acoplamento $k=0,0021$	72
Figura 62 – Circuito analisado em simulação com coeficiente de acoplamento $k=0,0087$	74
Figura 63 – Caso geral para cálculo da indutância mútua.	82
Figura 64 – Ponto P situado a uma distância r da superfície do cérebro.....	85
Figura 65 – Ambiente futurístico, sem a necessidade de fios conectados aos equipamentos.....	91

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Rendimento de potência para um sistema de transferência de potência indutiva.....	37
Gráfico 2 – Fatores de acoplamento calculados (linhas) e medidos (pontos) para duas bobinas planas com diâmetro de 30 mm.....	38
Gráfico 3 – Tensões e correntes versus frequência (análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,000439$).....	69
Gráfico 4 – Zoom das correntes versus frequência (detalhe da análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,000439$).....	69
Gráfico 5 – Tensões e correntes versus frequência (análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,0019$).....	71
Gráfico 6 – Zoom das correntes versus frequência (detalhe da análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,0019$).....	71
Gráfico 7 – Tensões e correntes versus frequência (análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,0021$).....	73
Gráfico 8 – Zoom das correntes versus frequência (detalhe da análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,0021$).....	73
Gráfico 9 – Tensões e correntes versus frequência (análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,0021$).....	75
Gráfico 10 – Zoom das correntes versus frequência (detalhe da análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,0021$).....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações das bobinas primárias.....	39
Tabela 2 – Especificações das bobinas secundárias.	40
Tabela 3 – Teste experimental com a bobina primária de fio branco com verde.	41
Tabela 4 – Teste experimental com a bobina primária de fio branco.	47
Tabela 5 – Teste experimental com a bobina primária de fio branco com azul.....	53
Tabela 6 – Teste experimental com a bobina primária de fio esmaltado.	60

LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÔNIMOS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
f.e.m.	Força eletromotriz
IARC	International Agency for Research on Cancer
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
LABSIEE	Laboratório de Segurança Iluminação e Eficiência Energética
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
MEG	Magnetencefalografia
MIT	Massachusetts Institute of Technology
OMS	Organização Mundial da Saúde
SI	Sistema Internacional
SQUID	<i>Superconducting Quantum Interference Device</i>
STF	Supremo Tribunal Federal
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos.....	18
1.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
1.2.1	Acoplamento indutivo ressonante.....	19
1.3	ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	LEI DE INDUÇÃO DE FARADAY	24
2.1.1	Indutância.....	26
2.2	INDUTÂNCIA ENTRE BOBINAS.....	26
2.2.1	Coeficiente de acoplamento	28
2.2.1.1	Acoplamento subcrítico	31
2.2.1.2	Acoplamento crítico.....	31
2.2.1.3	Acoplamento supercrítico.....	31
2.2.2	Coeficiente de acoplamento crítico.....	32
2.3	ESTRUTURA BÁSICA DO TRANSMISSOR DE ENERGIA SEM FIO	32
2.4	CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO PRODUZIDO POR UMA CORRENTE	33
3	RESULTADOS	36
3.1	PROTÓTIPO ESTUDADO.....	36
3.2	COMPONENTES DO PROTÓTIPO ESTUDADO	39
3.2.1	Bobinas primárias.....	39
3.2.2	Bobinas secundárias	39
3.3	RESULTADOS OBTIDOS	40
3.4	CONTINUIDADE DA PESQUISA	65
3.4.1	Primeira simulação	68
3.4.2	Segunda simulação	70
3.4.3	Terceira simulação	72
3.4.4	Quarta simulação	74

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
REFERÊNCIAS.....	79
ANEXO A – INDUTÂNCIA MÚTUA.....	82
ANEXO B – CAMPO MAGNÉTICO PRODUZIDO NA ATIVIDADE CEREBRAL	85
ANEXO C – INFLUÊNCIA DOS CAMPOS MAGNÉTICO E ELÉTRICO SOBRE A SAÚDE HUMANA.....	87
ANEXO C.1 – RESTRIÇÕES PARA CAMPOS MAGNÉTICO E ELÉTRICO PRODUZIDOS PELA ENERGIA ELÉTRICA.....	89
ANEXO C.2 – CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS CAMPOS MAGNÉTICOS ...	90
ANEXO D – UM AMBIENTE FUTURÍSTICO SEM FIOS.....	91

1 INTRODUÇÃO

Um dos pioneiros que desenvolveram a transmissão de energia sem fio foi Nikola Tesla. Entre suas contribuições para o avanço do mundo moderno estão o desenvolvimento do rádio, demonstrando a transmissão sem fios em 1894, a robótica, o controle remoto, o radar, a ciência computacional, a balística, a física nuclear e a física teórica (PAULA, 2015).

Tesla tentou, entre o final do século XIX e início do século XX, transmitir grande quantidade de energia sem a necessidade da rede elétrica. Seus resultados não foram muito satisfatórios devido às grandes perdas que o sistema apresentava e a necessidade de bobinas de elevadas dimensões, não obtendo um sucesso plausível de se colocar em prática de forma imediata. Porém seus estudos nessa área foram, e ainda são, de grande utilidade para a transmissão de energia sem fio e sistemas que se utilizam do campo elétrico e de ondas de rádio para funcionar (ABREU, 2012).

Atualmente, no mundo globalizado, há cada vez mais a necessidade de se utilizar produtos eletroeletrônicos. Com isso, aumentou-se consideravelmente o número de fios e cabos distribuídos no percurso.

Esse fato pode proporcionar riscos de acidentes às pessoas, que se enroscam ou até tropeçam nestes fios, dificultando a circulação das mesmas. Além disso, quando os fios/cabos se encontram aglomerados, também podem ser um excelente local para moradia de animais peçonhentos, dependendo da quantidade de fios/cabos em questão e da situação em que estiverem localizados.

Reduzir a quantidade desses fios e cabos é uma alternativa plausível para diminuir esses problemas. Para sua viabilidade, algumas hipóteses foram estudadas.

A teoria da transmissão de energia elétrica sem fio foi a solução mais adequada, de acordo com o que está apresentado no Capítulo 2 e, além disso, foi viável sua implementação na forma de protótipo para testes de análise e fundamentação conceitual.

1.1 OBJETIVOS

Esta seção visa apresentar o objetivo geral e os objetivos específicos, expondo claramente o escopo deste trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar e construir um protótipo de transmissor de energia elétrica sem fio.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Descrever o princípio de funcionamento do transmissor de energia elétrica sem fio;
- Construir um protótipo de transmissor de energia elétrica sem fio para estudo experimental, que comprove a validade do conceito;
- Relacionar as variáveis que influenciam diretamente as grandezas de tensão e corrente de um transmissor de energia elétrica sem fio.

1.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Construiu-se um protótipo transmissor de energia sem fio, conforme sugestão de Vieira (2013), com um circuito oscilador gerando um campo magnético alternado, numa frequência de aproximadamente 1,9MHz a 2MHz. O circuito esquemático utilizado está apresentado no item 3.1 (Protótipo Estudado).

Em seguida, foram estudados seu comportamento e suas características de acordo com a teoria apresentada ao longo do Capítulo 2.

Para a construção do protótipo foram utilizados os seguintes materiais:

- Componentes eletrônicos;
- Estrutura para base do protótipo;
- Fios esmaltados e fios de cabo de rede de dados (“cabo azulão” de internet) para elaboração das bobinas;
- Fita adesiva para enrolar as espiras das bobinas;
- Fonte de tensão contínua de 9V para alimentar o circuito.

Com este material foi construído um circuito utilizando-se a técnica do acoplamento indutivo ressonante e estudaram-se as características do sistema.

1.2.1 Acoplamento indutivo ressonante

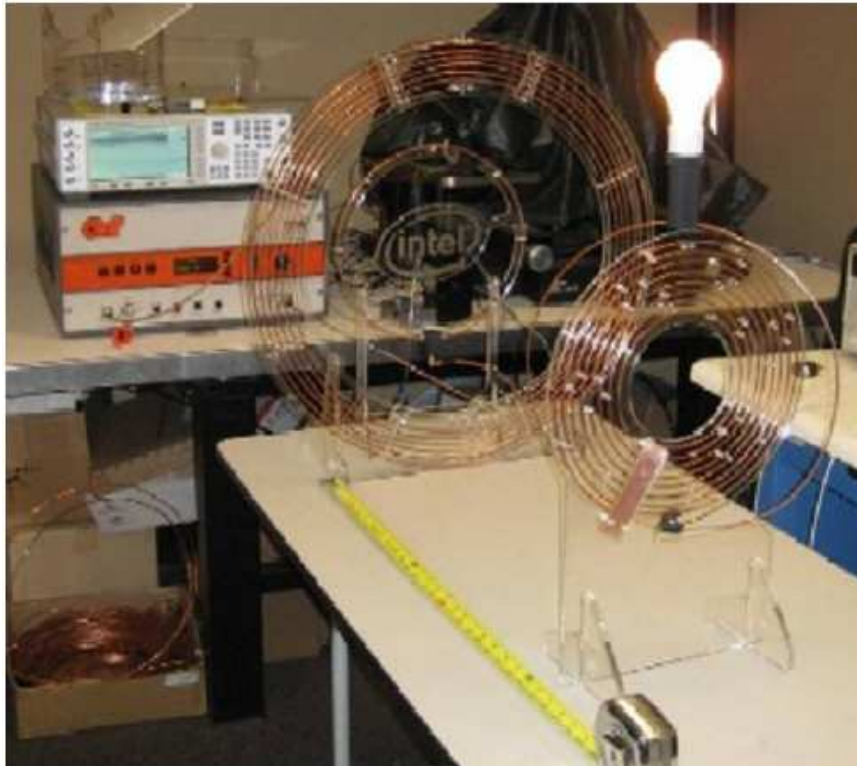
O acoplamento indutivo ressonante é um método atual que se encontra em expansão e desenvolvimento após experiências realizadas por equipes da Intel e do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (conhecido também em inglês como *Massachusetts Institute of Technology* – MIT). O professor John Boys provou que este método, que faz uso de duas bobinas sob ressonância eletromagnética, é bastante eficaz comparativamente a outras transmissões de baixas potências (GONDIM, 2010).

Em 2007, o Professor Marin Soljacic e a sua equipe do MIT apresentaram um método inovador capaz de alimentar uma lâmpada de 60 W a 2 metros de distância com uma eficiência de 40% (Figura 1). O método usado pela equipe foi o acoplamento indutivo ressonante (MIGUEL; BONIFÁCIO, 2009).

Em agosto de 2008, no *Intel Development Forum* realizado em San Francisco, Alanson Sample, da Universidade de Washington e estagiário da Intel, seguindo o método inovador da equipe do MIT, iluminou uma lâmpada a uma distância de 60 cm com uma eficiência de 75%. Na Figura 2, pode-se ver o protótipo desenvolvido (MIGUEL; BONIFÁCIO, 2009).



**Figura 1 – Protótipo do MIT para iluminar uma lâmpada de 60 W.
Fonte: Miguel; Bonifácio (2009).**



**Figura 2 – Protótipo da Intel para iluminar uma lâmpada.
Fonte: Miguel; Bonifácio (2009).**

A base deste sistema é a mesma de um transformador tradicional, com a existência de um campo magnético produzido por uma bobina, que induz uma corrente em uma segunda bobina. Atualmente, alguns aparelhos eletrônicos aplicam esta tecnologia para a recarga de suas baterias, tais como acontece em alguns carregadores de celulares, como mostra a Figura 3.



Figura 3 – Carregador de celular *wireless*.

Fonte: Martins (2014).

Os melhores resultados foram obtidos utilizando-se pulsos de tensão e baixas frequências em um sistema onde duas bobinas se encontram em ressonância (GONDIM, 2010).

A Figura 4 representa a disposição das bobinas durante uma experiência envolvendo o acoplamento indutivo ressonante. A bobina indicada por (1) é ligada à tomada convencional e a um conversor de tensão e frequência indicados por (2). A bobina indicada por (4) é a bobina ressonante ligada à lâmpada a ser acionada e (3) corresponde a um obstáculo existente entre as duas bobinas que estão em ressonância.

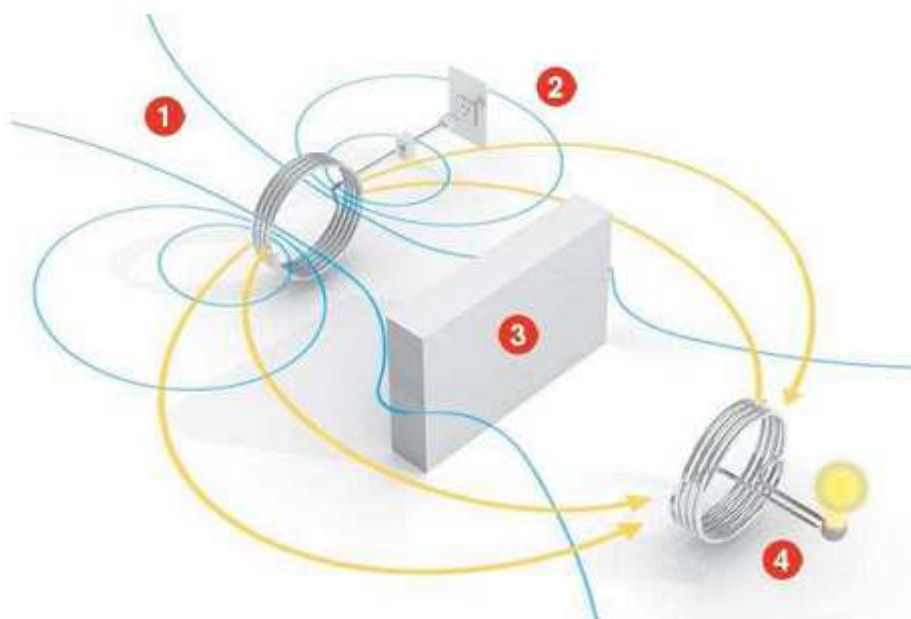


Figura 4 – Esquema representativo do acoplamento indutivo ressonante.

Fonte: Gondim (2010).

O acoplamento ocorre quando uma fonte de energia é capaz de transmitir sua potência para a fonte diretamente acoplada. O acoplamento indutivo se dá quando o campo magnético de uma bobina ligada a uma fonte interage com a bobina acoplada e induz uma corrente elétrica na mesma, possibilitando assim a transferência de energia de uma fonte a outro dispositivo.

A frequência de ressonância pode ser definida como a frequência natural que permite a transferência máxima de energia a um sistema oscilante. A ressonância em um sistema composto por dois indutores ocorre quando a frequência natural de oscilação do campo magnético das mesmas é idêntica (GONDIM, 2010).

1.3 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

Esta monografia traz uma breve fundamentação teórica, no Capítulo 2, com uma revisão bibliográfica, e são apresentadas algumas informações para conhecimento prévio do leitor, visando um melhor entendimento no decorrer da descrição deste trabalho.

O Capítulo 3 aborda os resultados, destacando quais as faixas de operação abordadas para esse tipo de transmissão em baixa tensão, como as distâncias alcançadas para se conseguir obter uma boa conectividade entre os circuitos sem fio e os diâmetros das bobinas. Este tópico também demonstra, com o auxílio de simulações computacionais, a possibilidade de se estabelecer tensão e corrente entre dois circuitos, de maneira sem fio, variando-se apenas a distância entre as bobinas, seus diâmetros e a frequência do circuito primário.

No Capítulo 4, faz-se as considerações finais e são apresentadas algumas conclusões e ideias a respeito da transmissão de energia elétrica sem fio.

Por fim, em anexo, são apresentados uma forma de implementação prática da indutância mútua definida em projeto e um outro ponto importante: a influência da transmissão de energia sem fio sobre a saúde humana, relacionando alguns efeitos que seu uso demasiado pode ocasionar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir serão abordados conhecimentos prévios sobre o tema da transmissão de energia elétrica sem fio, para um melhor entendimento desta monografia.

2.1 LEI DE INDUÇÃO DE FARADAY

A maior parte dos geradores de eletricidade, como no caso de usinas hidroelétricas e termoelétricas ou em alternadores de automóveis, por exemplo, funciona com base em uma das leis fundamentais do eletromagnetismo: a produção de uma força eletromotriz induzida devido à variação do fluxo de um campo magnético (UFMG, 2015).

A força eletromotriz ε que é induzida em torno de um caminho fechado é igual à taxa de variação do fluxo de campo magnético na área interceptada por esse caminho. Esse enunciado, conhecido como Lei de Faraday, pode ser expresso como:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

em que $\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$ é o fluxo magnético através de uma superfície e $d\mathbf{A}$ é um vetor que é perpendicular a essa superfície e tem módulo dA . Ou seja, “o módulo da força eletromotriz ε induzida em uma espira condutora é igual à taxa de variação com o tempo do fluxo magnético Φ_B que atravessa a espira.”

O sinal negativo na Equação 1 determina a polaridade da força eletromotriz induzida e tem uma interpretação física simples, conhecida como Lei de Lenz: a polaridade da força eletromotriz induzida é tal que tende a produzir uma corrente que cria um fluxo magnético para se opor à variação do fluxo que a gerou (UFMG, 2015).

Para o caso especial representado na Figura 5, em que uma superfície plana de área A está em um campo magnético uniforme \mathbf{B} , que faz um ângulo θ com $d\mathbf{A}$, o fluxo magnético através dessa superfície é dado por:

$$\Phi_B = BA \cos \theta \quad (2)$$

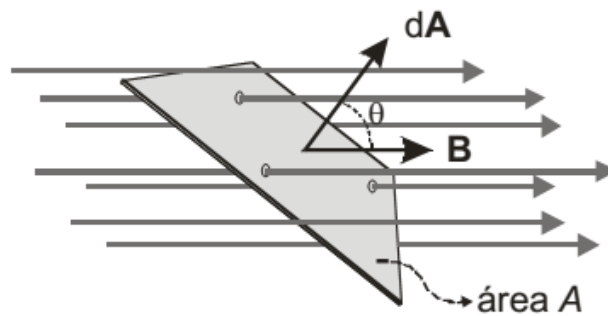


Figura 5 – Fluxo de campo magnético através de uma superfície plana de área A.

Fonte: UFMG, 2015.

Se uma bobina tem N espiras e se o mesmo fluxo passa por todas elas, então a tensão induzida ao longo de toda a bobina é dada por (CHAPMAN, 2013):

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3)$$

Em outras palavras, se o fluxo magnético através de uma bobina de N espiras sofre uma variação, uma força eletromotriz é induzida em cada espira e a força eletromotriz total é a soma dessas forças eletromotrizes. Se as espiras da bobina estão muito próximas (enrolamento compacto), o mesmo fluxo magnético Φ_B atravessa todas as espiras e a força total induzida na bobina é dada pela Equação 3.

Segundo Halliday (2009), há três formas de mudar o fluxo magnético que atravessa uma bobina:

- Mudar o módulo B do campo.
- Mudar a área total da bobina ou parte da área atravessada pelo campo magnético (aumentando ou diminuindo o tamanho da bobina, no primeiro caso, e colocando uma parte maior ou menor da bobina na região onde existe o campo, no segundo caso).
- Mudar o ângulo entre a orientação do campo magnético \vec{B} e o plano da bobina (fazendo girar a bobina, por exemplo).

2.1.1 Indutância

Se as espiras do solenoide do indutor conduzem uma corrente i , a corrente produz um fluxo magnético Φ_B na região central do indutor. A indutância do indutor é definida por:

$$L = \frac{N\Phi_B}{i} \quad (4)$$

onde N é o número de espiras. As espiras do solenoide estão “enlaçadas” pelo fluxo magnético e o produto $N\Phi_B$ é chamado de *enlaçamento de fluxo magnético*. A indutância L é, portanto, uma medida do enlaçamento de fluxo magnético produzido pelo indutor por unidade de corrente.

Como a unidade de fluxo magnético no Sistema Internacional (SI) é o tesla-metro quadrado, a unidade de indutância no SI é o tesla-metro quadrado por ampère ($\text{T} \cdot \text{m}^2/\text{A}$). Esta unidade é chamada de henry (H) em homenagem ao físico americano Joseph Henry, contemporâneo de Faraday, um dos descobridores da lei da indução. Assim:

$$1 \text{ henry} = 1 \text{ H} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2/\text{A}$$

2.2 INDUTÂNCIA ENTRE BOBINAS

Conforme estudado anteriormente, a Lei de Lenz pode ser expressa da seguinte forma: “O sentido de uma corrente induzida é tal que o campo magnético produzido pela corrente se opõe a variação do fluxo magnético que induziu a corrente. A força eletromotriz induzida tem o mesmo sentido que a corrente induzida.” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009)

Levando-se em consideração a Figura 6, onde existem duas bobinas próximas entre si, é possível perceber a existência do fluxo magnético de uma bobina enlaçando as espiras da outra. Nesta figura, a bobina A tem N_A espiras e a bobina B tem N_B espiras. Se na bobina A circular uma corrente variável, surgirá um fluxo variável, que dará origem a uma f.e.m. na própria bobina (f.e.m. auto-induzida) e

também uma f.e.m. na bobina B (f.e.m. de mútua-indução), a qual tem um sentido tal que tenta impedir a variação do fluxo na primeira bobina (LAMAS, 2015).

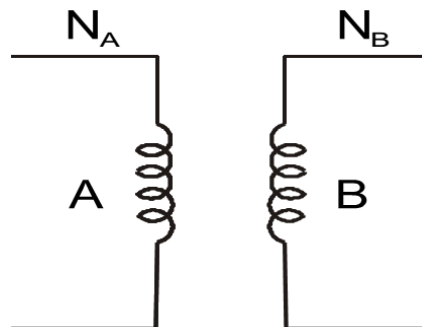


Figura 6 – Bobinas.

Fonte: Lamas, 2015.

A indutância mútua é um coeficiente que mede o acoplamento magnético existente entre duas bobinas, de acordo com a quantidade de espiras em cada uma e com a posição relativa entre elas. Lamas (2015) apresenta três casos de acoplamentos magnéticos, conforme a Figura 7. No caso (a), as espiras forma colocadas perpendicularmente entre si, de modo que o acoplamento magnético é nulo. No caso (b), as espiras estão num mesmo plano espacial, porém não estão justapostas uma dentro da outra, proporcionando assim um acoplamento médio, ou seja, uma determinada quantidade de fluxo produzido numa espira consegue atingir a outra espira. No caso (c), é obtido um acoplamento magnético máximo, pois as espiras estão justapostas uma dentro da outra.

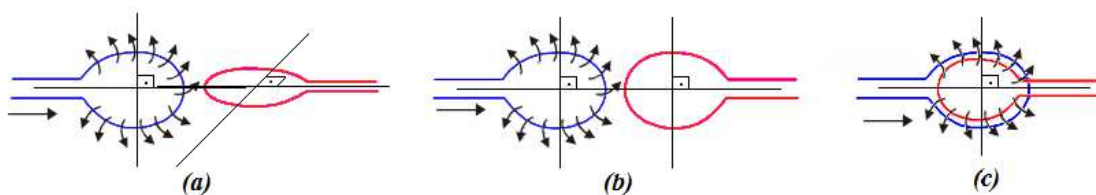


Figura 7 – Três situações diferentes de acoplamento magnético: (a) nulo, (b) médio, (c) máximo.

Fonte: Adaptado de Lamas, 2015.

Veja o circuito da Figura 8: há duas bobinas, sendo uma delas alimentada por uma fonte de tensão em corrente contínua e a outra tendo, entre seus terminais, um miliamperímetro. Considerando-se que as bobinas estão próximas, de modo que o fluxo produzido por uma atinge a outra, pode-se afirmar que existirá corrente induzida na bobina da direita (bobina secundária), desde que o fluxo através dela

varie. Isso será obtido nos instantes de abertura ou de fechamento da chave, porém no instante de abertura a variação de fluxo é mais rápida, obtendo-se uma tensão induzida muito elevada. Para isso, pode-se utilizar um circuito chaveado, conforme o que foi utilizado no presente trabalho. Outra possibilidade para se conseguir induzir corrente na segunda bobina é movimentar uma das bobinas, pois assim também ocorreria uma variação de fluxo magnético (LAMAS, 2015).

Além disso, é importante saber também que um campo magnético variável produz um campo elétrico (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

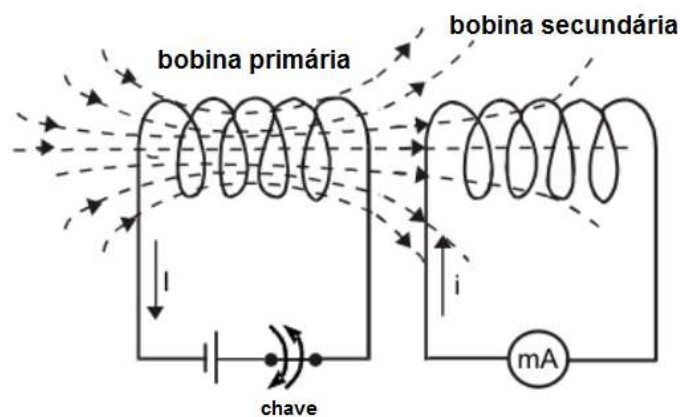


Figura 8 – Circuitos acoplados magneticamente.

Fonte: Adaptado de Lamas (2015).

2.2.1 Coeficiente de acoplamento

De acordo com Hayt Junior (2008), o grau com o qual M se aproxima do seu valor máximo é descrito pelo coeficiente de acoplamento, definido como:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (5)$$

em que $0 \leq k \leq 1$ ou de forma equivalente $0 \leq M \leq \sqrt{L_1 L_2}$. Ou seja, a indutância mútua não pode ser maior do que a média geométrica da autoindutância das bobinas, de forma que:

$$M \leq \sqrt{L_1 L_2} \quad (6)$$

onde:

- k representa o coeficiente de acoplamento entre as bobinas;
- L_1 representa a indutância da bobina primária em [H];
- L_2 representa a indutância da bobina secundária em [H];
- M representa a indutância mútua entre as bobinas em [H].

O coeficiente de acoplamento é a fração do fluxo total emanado por uma bobina que atua na outra (SADIKU; MUSA; ALEXANDER, 2014). Por exemplo, na Figura 9:

$$k = \frac{\phi_{12}}{\phi_1} = \frac{\phi_{12}}{\phi_{11} + \phi_{12}} \quad (7)$$

e na Figura 10:

$$k = \frac{\phi_{21}}{\phi_2} = \frac{\phi_{21}}{\phi_{21} + \phi_{22}} \quad (8)$$

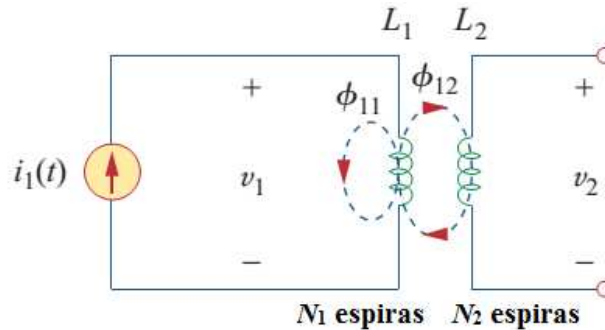


Figura 9 – Indutância mútua M_{21} da bobina 2 em relação a bobina 1.

Fonte: Sadiku; Alexander (2009).

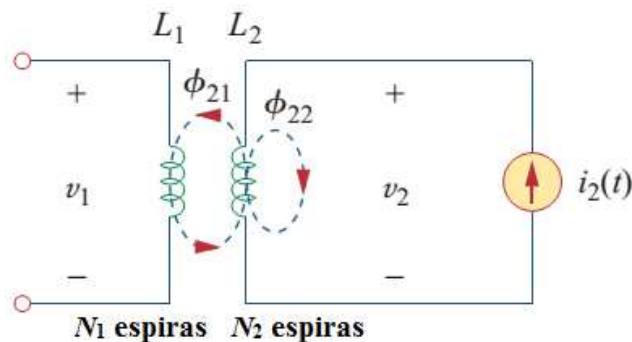


Figura 10 – Indutância mútua M_{12} da bobina 1 em relação a bobina 2.

Fonte: Sadiku; Alexander (2009).

Se todo o fluxo produzido por uma bobina atua na outra bobina, então $k = 1$ e temos 100% de acoplamento, ou as bobinas são consideradas perfeitamente acopladas. Portanto, o coeficiente de acoplamento k é uma medida do acoplamento magnético entre duas bobinas, com $0 \leq k \leq 1$.

Para $k < 0,5$, a bobina é considerada *levemente acoplada* e para $k > 0,5$, a bobina é considerada *fortemente acoplada*.

Portanto, os valores de coeficiente de acoplamento são obtidos com bobinas fisicamente próximas (Figura 11), que são enroladas ou orientadas de forma a prover um maior fluxo magnético comum, ou que contém um caminho comum passando por um material que concentre e localize o fluxo magnético, ou seja, um material com alta permeabilidade (HAYT JUNIOR; KEMMERLY; DURBIN, 2008).

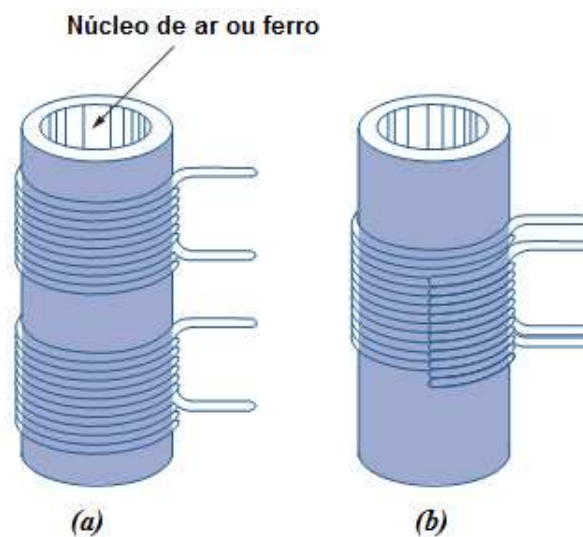


Figura 11 – Enrolamento: (a) levemente acoplado; (b) fortemente acoplado.

Fonte: Sadiku; Alexander (2009).

O coeficiente de acoplamento, k , é o fator mais importante para se determinar a operação de um modelo de acoplamento ressonante, uma vez que sua magnitude relativamente à magnitude do coeficiente de acoplamento crítico caracteriza a eficiência da transmissão de energia a ser efetuada.

A seguir, relaciona-se os três tipos de regimes distintos existentes, sendo considerado um fator de qualidade grande o suficiente para que alguma dinâmica possa ser observada antes do fim da curva estabelecida. Os três regimes analisados são: acoplamento subcrítico, acoplamento crítico e acoplamento supercrítico.

2.2.1.1 Acoplamento subcrítico

O acoplamento subcrítico ocorre quando o coeficiente de acoplamento é inferior ao coeficiente crítico ($0 < k < k_{crítico}$). A tensão de saída oscila e cresce até um pico e, em seguida, decresce até atingir um valor nulo. A curva de resposta apresenta apenas um ponto máximo. A tensão de saída e a transmissão de potência acontecem com baixa eficiência, visto que o primário não emite fluxo suficiente para que a energia seja absorvida pelo secundário antes que ocorra a dissipação da mesma neste lado do circuito (GONDIM, 2010).

2.2.1.2 Acoplamento crítico

O acoplamento crítico ocorre para $k = k_{crítico}$. A curva de resposta continua a apresentar apenas um ponto de máximo, mas o pico é bem menor. É importante saber que o pico não representa o valor de máxima tensão para um pulso no domínio do tempo. O pico indica que a frequência no qual o mesmo ocorre corresponde à frequência de ressonância dada em um circuito ressonante em que as impedâncias estão perfeitamente acopladas. A transmissão é máxima e as perdas são mínimas, mas, segundo Gondim (2010), a construção de um sistema com coeficiente de acoplamento k preciso é muito difícil de ser feita.

2.2.1.3 Acoplamento supercrítico

O acoplamento supercrítico ocorre para $k_{crítico} < k < 1$. A resposta em frequência apresenta dois pontos de máximo e a transmissão de um lado ao outro é satisfatória. Os picos representam a transferência do primário para o secundário e vice-versa. De acordo com Gondim (2010), os desvios em frequência máximos são dados a partir da equação:

$$v_{1,2} = \mp \frac{1}{2} \sqrt{k^2 - \frac{1}{Q_0^2}} \quad (9)$$

e, em seguida, para se obter a frequência, basta-se adotar a noção de desvio de frequência, onde ω representa a frequência angular:

$$\omega = \omega_0(1 + \nu) \quad (10)$$

para $-1 \leq \nu \leq 1$, sendo:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (11)$$

e Q_0 está definido no item 2.2.2, a seguir.

2.2.2 Coeficiente de acoplamento crítico

Para ser calculado o coeficiente de acoplamento crítico pode-se utilizar a equação demonstrada por Gondim (2010):

$$k_{crítico} = \frac{1}{Q_0} \quad (12)$$

onde Q_0 é um fator de qualidade, dado por:

$$Q_0 = \frac{R}{\omega_0 L} \quad (13)$$

e ω_0 está apresentado na Equação 11, vista anteriormente.

2.3 ESTRUTURA BÁSICA DO TRANSMISSOR DE ENERGIA SEM FIO

A estrutura do sistema de um transmissor de energia sem fio é apresentada na Figura 12. O sistema de transmissão de energia sem fio inclui quatro partes principais: sinal de alta frequência senoidal e circuito amplificador de potência, bobina de estimulação e bobina primária ressonante, bobina secundária de ressonância e de absorção de energia da bobina, e filtro retificador para o circuito da carga. A bobina de estimulação é ligada com o circuito amplificador de potência e a absorção de energia da bobina é ligada com a carga. O sistema proposto utiliza um par de ressoadores com a mesma forma e estrutura para conseguir a transferência de energia sem fio (ZHAO et al., 2013).

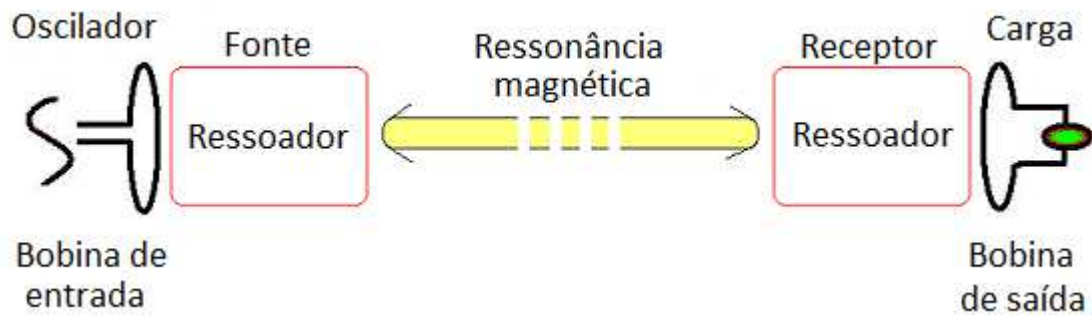


Figura 12 – Estrutura básica de um transmissor de energia elétrica sem fio.

Fonte: Adaptado de Zhao et al (2012).

Segundo Li et al. (2011), algumas técnicas utilizam propagação de ondas eletromagnéticas que transferem energia da mesma forma que rádios transmitem sinais. Este método tem sido utilizado com sucesso para frequências acima de 300 MHz, em etiquetas RFID (*Radio Frequency Identification* – Identificação por Rádio Frequência), que não têm baterias e possuem uma faixa de trabalho de aproximadamente 10 metros.

Quando os controles apropriados são colocados na antena de transferência e no receptor da antena, a transferência de energia pode ser altamente direcional em tal campo de alta frequência. No entanto, qualquer objeto estranho entre as antenas pode causar o rompimento da transferência adequada. Além disso, a concepção do controlador da antena é extremamente complicada quando for utilizada para objetos móveis (LI et al., 2011).

O circuito esquemático do protótipo que foi construído encontra-se no tópico 1.2 (MATERIAIS E MÉTODOS).

2.4 CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO PRODUZIDO POR UMA CORRENTE

A Figura 13 mostra um fio de forma arbitrária percorrido por uma corrente i , na qual um elemento de corrente $i d\vec{s}$ produz um elemento de campo magnético $d\vec{B}$ no ponto P . O \times (que representa a extremidade traseira da seta) no ponto P indica que o sentido do campo $d\vec{B}$ é para dentro do papel.

Para calcular a indução magnética \vec{B} em um ponto próximo P , divide-se mentalmente o fio de elementos infinitesimais ds e é definido para cada elemento um vetor de comprimento $d\vec{s}$ cujo módulo é ds e cuja direção é a direção da corrente no elemento ds . Pode-se definir um elemento de corrente como $i d\vec{s}$ e calcular o campo $d\vec{B}$ produzido no ponto P por um elemento de corrente típico. Os experimentos mostram que os campos magnéticos, assim como os campos elétricos, podem ser somados para determinar o campo total. Assim, é possível calcular o campo total \vec{B} no ponto P somando, por integração, as contribuições $d\vec{B}$ de todos os elementos de corrente. Entretanto, esse processo é um pouco mais complicado do que no caso do campo elétrico por causa de uma diferença: enquanto o elemento de carga dq que produz o campo elétrico é uma grandeza escalar, o elemento de corrente $i d\vec{s}$ responsável pelo campo magnético é o produto de uma grandeza escalar por uma grandeza vetorial e, portanto, é uma grandeza vetorial.

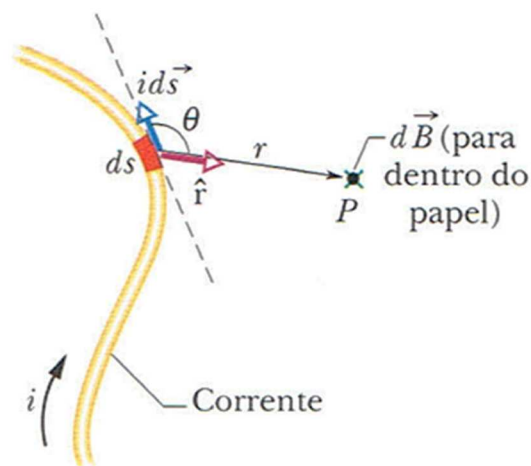


Figura 13 – Produção de um elemento de campo magnético $d\vec{B}$ no ponto P .

Fonte: Halliday; Resnick; Walker (2009).

O módulo do campo $d\vec{B}$ produzido no ponto P por um elemento de corrente $i d\vec{s}$ é dado por:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i ds \sen \theta}{r^2} \quad (14)$$

onde θ é o ângulo entre as direções de $d\vec{s}$, \hat{r} é o vetor que liga ds a P , e μ_0 é uma constante, conhecida como permeabilidade do vácuo, cujo valor, por definição, é dado por:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} / \text{A} \approx 1,26 \times 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m} / \text{A} \quad (15)$$

A direção de $d\vec{B}$, que é para dentro do papel na Figura 13, é a do produto vetorial $d\vec{s} \times \hat{r}$. Pode-se, portanto escrever a Equação 14, em forma vetorial, como:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2} \quad (16)$$

Esta equação vetorial e sua forma escalar apresentada anteriormente na Equação 14, são conhecidas como lei de Biot-Savart. A lei, que se baseia em observações experimentais, é do tipo inverso do quadrado. Essa lei é usada para se calcular o indução magnética total \vec{B} produzido em um ponto por fios de várias geometrias.

3 RESULTADOS

3.1 PROTÓTIPO ESTUDADO

O circuito esquemático do transmissor de energia sem fio que foi construído está apresentado na Figura 14, mostrando todos os componentes eletrônicos que foram utilizados.

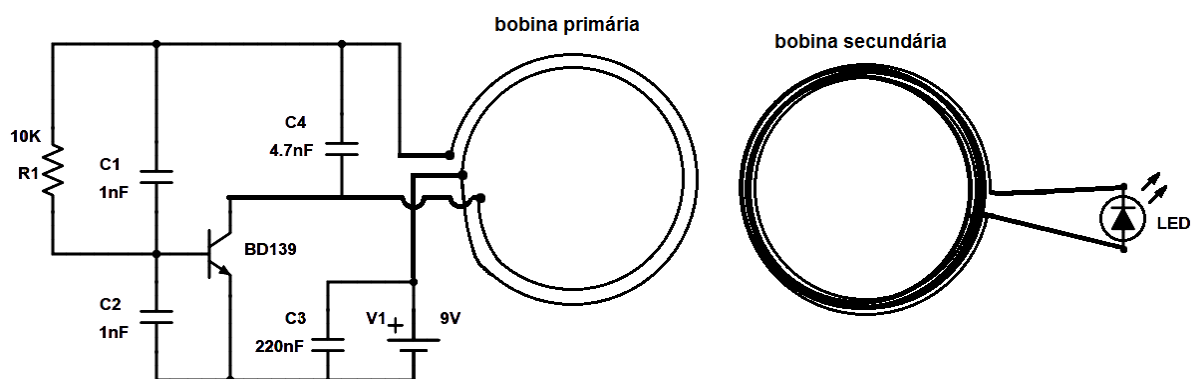


Figura 14 – Circuito esquemático do transmissor de energia sem fio.

Fonte: Autoria própria.

Como o sistema de transmissão de energia se dá através da indução, é possível colocar mais de uma bobina no secundário, fazendo o LED de cada bobina se acender ao mesmo tempo.

A lógica do sistema é simples: tem-se uma bobina que recebe a carga elétrica e gera o campo magnético induzindo-o em outra bobina, só que esta última se encontra no aparelho que contém o circuito a ser carregado. Na Figura 15 se encontra uma representação básica da tecnologia. Esta bobina (Figura 15), que se encontra no aparelho que irá converter a indução em energia elétrica, foi construída com o mesmo diâmetro (ou menor) que a bobina que gera o campo, conforme as explicações de Paiotti (2010).

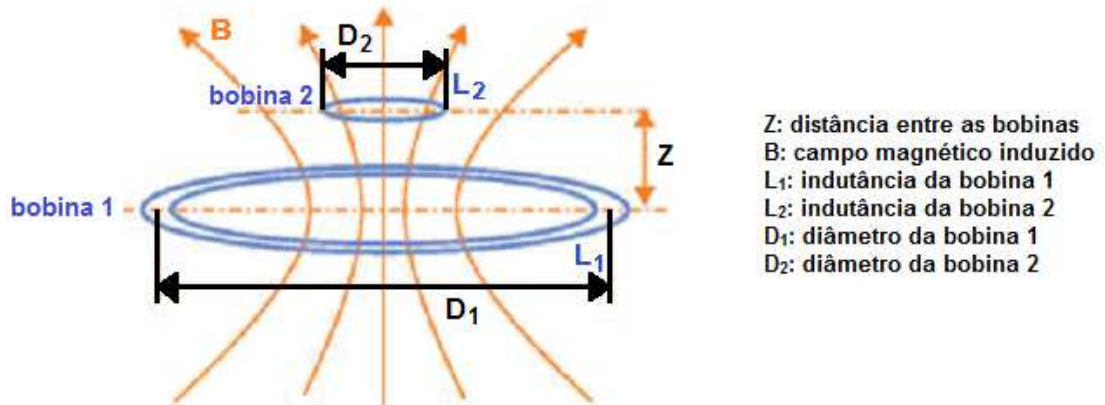


Figura 15 – Arranjo típico de um Sistema de Transferência de Potência acoplado indutivamente.

Fonte: Adaptado de Paiotti, 2010.

Assim, foi possível verificar que o gráfico apresentado por Paiotti (Gráfico 1) está coerente com as situações reais estudadas, pois observou-se que quanto mais próximo o diâmetro da bobina 1 estiver da bobina 2, melhor foi o aproveitamento da carga. Analogamente, quanto maior foi a diferença entre o diâmetro da bobina 1 e o diâmetro da bobina 2, menor foi a eficiência (rendimento). Porém é importante dizer que para esta verificação foi preciso levar-se em consideração o número de voltas das bobinas, que no caso do presente estudo variava em cada uma das bobinas.

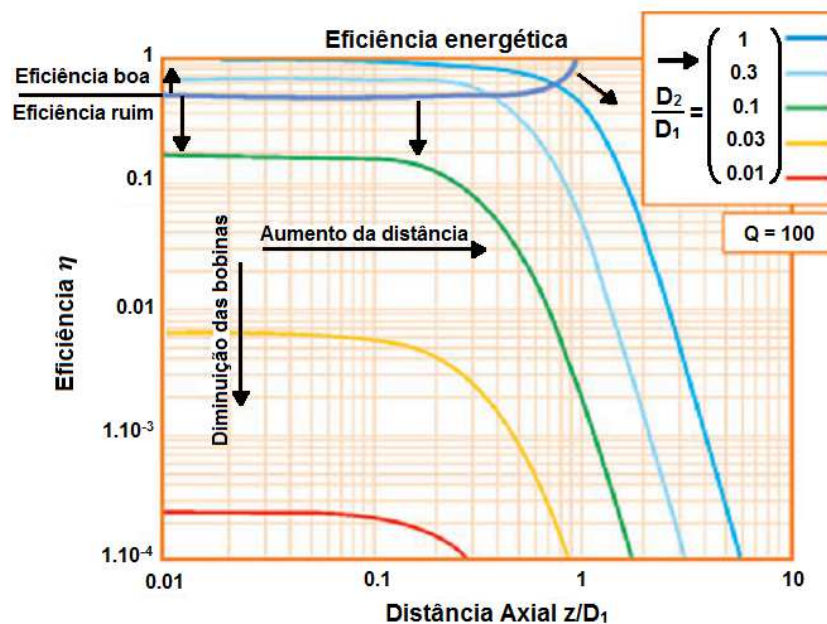


Gráfico 1 – Rendimento de potência para um sistema de transferência de potência indutiva.

Fonte: Adaptado de Paiotti, 2010.

Neste mesmo Gráfico 1, tem-se também a queda da eficiência referente à distância entre as bobinas. É possível observar que a área de eficiência plena é bem curta, embora quanto melhor o material empregado nas bobinas, melhor será a eficiência e menor será o consumo (PAIOTTI, 2010). No estudo desta monografia em questão o material estudado foi sempre o cobre, porém em duas bobinas (uma primária e uma secundária) optou-se por se utilizar fio de cobre esmaltado, ao invés de se utilizar simplesmente fios de cobre.

Ainda conforme Paiotti (2010), um outro fator que interfere na eficiência da indução é o grau de inclinação em que as bobinas se encontram uma da outra. Isso também foi comprovado, pois quanto mais paralelas as bobinas primárias e secundárias estavam umas das outras, maior foi a eficiência obtida para se acender os LEDs dos circuitos secundários.

No Gráfico 2 pode-se observar a perda da qualidade do fluxo magnético que a bobina receptora capta em relação à posição da bobina transmissora, tanto em distância como em deslocamento lateral de acordo com os estudos de Paiotti (2010).

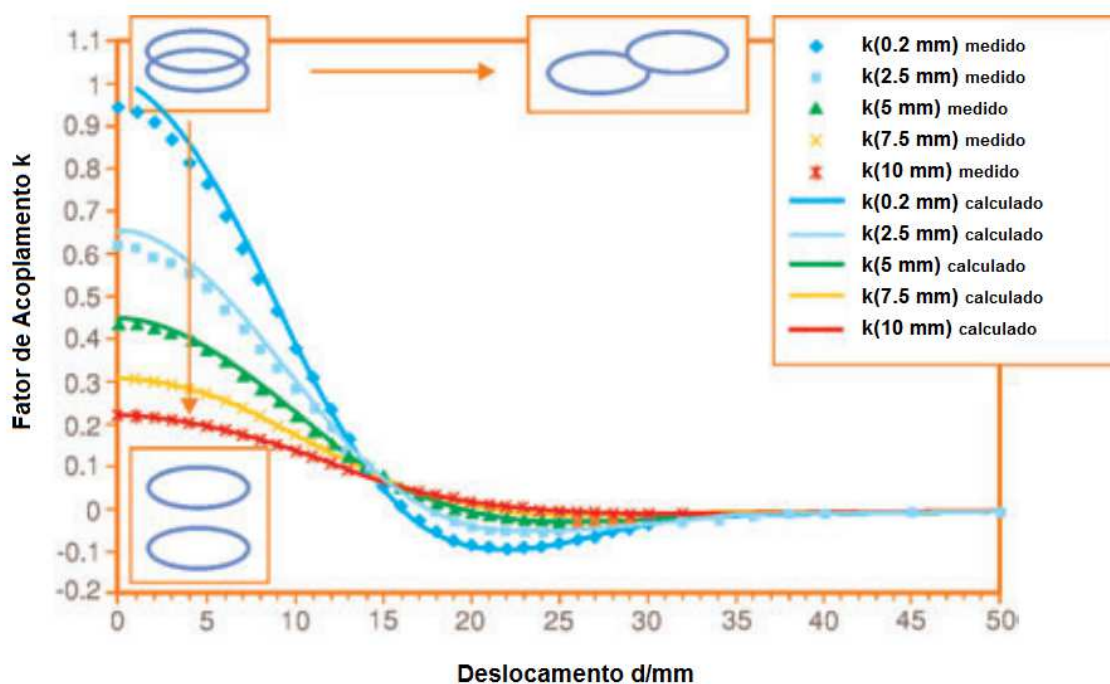


Gráfico 2 – Fatores de acoplamento calculados (linhas) e medidos (pontos) para duas bobinas planas com diâmetro de 30 mm.

Fonte: Adaptado de Paiotti, 2010.

3.2 COMPONENTES DO PROTÓTIPO ESTUDADO

3.2.1 Bobinas primárias

Foram estudadas quatro bobinas primárias (Figura 16), cujas especificações podem ser vistas na Tabela 1. É interessante observar que a bobina primária de fio esmaltado já foi fotografada juntamente com o transmissor de energia sem fio.

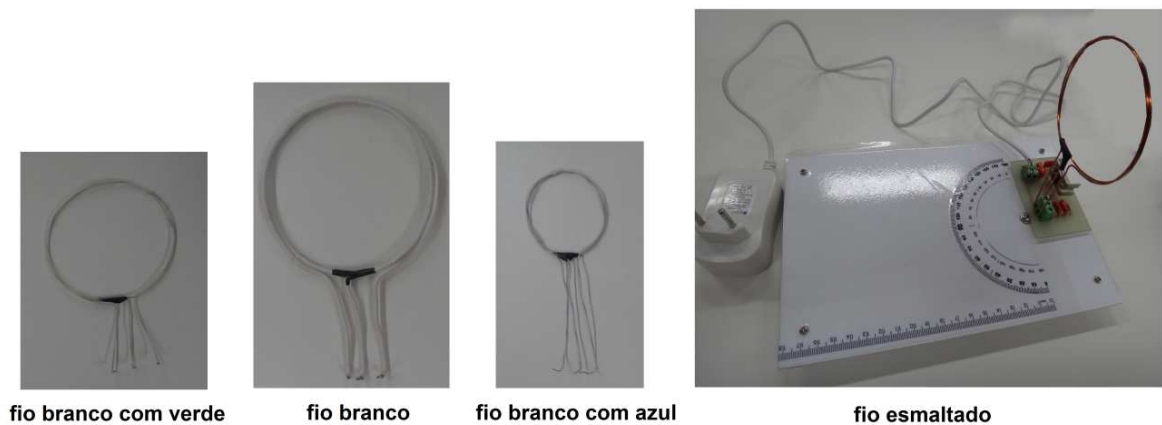


Figura 16 – Bobinas primárias e transmissor de energia sem fio.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 1 – Especificações das bobinas primárias.

BOBINA PRIMÁRIA	QUANTIDADE DE VOLTAS	DIÂMETRO (cm)
fio branco com verde	2	6,5
fio branco	2	10
fio branco com azul	2	5
fio esmaltado	2	7,5

Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Bobinas secundárias

Foram estudadas cinco bobinas secundárias (Figura 17), cujas especificações podem ser vistas na Tabela 2. Vale lembrar que *quantidade de voltas* se refere a *quantidade de espiras* da bobina.

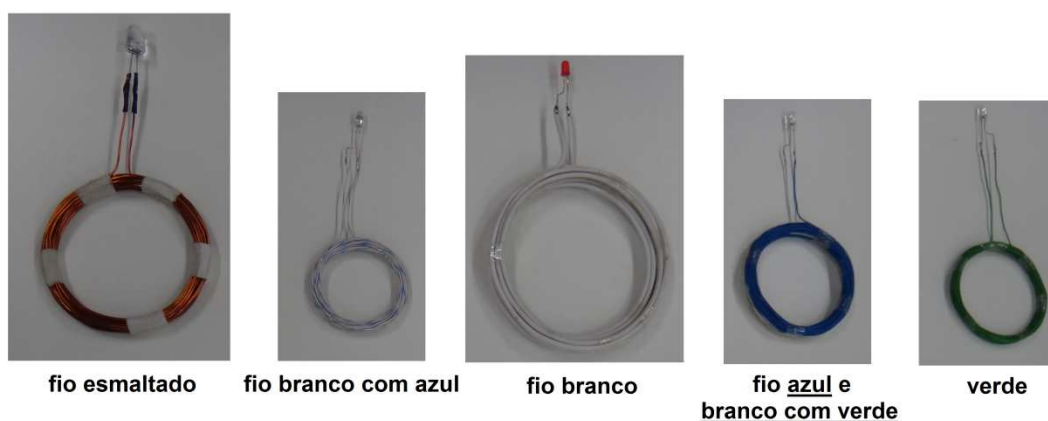


Figura 17 – Bobinas secundárias.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Especificações das bobinas secundárias.

BOBINA SECUNDÁRIA	QUANTIDADE DE VOLTAS	DIÂMETRO (cm)	LED		
			COR	TAMANHO	MODELO
fio esmaltado	30	7,5	amarelo	grande	alta intensidade
fio branco com azul	27	5	branco	médio	alta intensidade
fio branco	10	10	vermelho	médio	simples
fio azul e branco com verde	42	6,5	amarelo	médio	alta intensidade
verde	25	6,5	vermelho	médio	alta intensidade

Fonte: Autoria própria.

3.3 RESULTADOS OBTIDOS

Da Tabela 3 à Tabela 6, a seguir, estão relacionadas todas as combinações estudadas entre as bobinas primárias e secundárias, onde as distâncias se referem ao quão longe os LEDs conseguiram alcançar permanecendo acesos, com uma luminosidade máxima e com uma luminosidade mínima.

Observação: O termo “luminosidade baixa” utilizado nas figuras (fotografias) a seguir, não indica “luminosidade mínima”, pois algumas luminosidades mínimas descritas nas Tabelas 3 a 6 não ficaram visíveis nas fotografias.

As Figuras 18 a 26 são fotos das situações relacionadas na Tabela 3 (ao se utilizar a bobina primária de fio branco com verde).

Tabela 3 – Teste experimental com a bobina primária de fio branco com verde.

Com bobina primária de fio branco com verde:			
SITUAÇÃO	BOBINA SECUNDÁRIA	DISTÂNCIAS (cm)	
		LUMINOSIDADE MÁXIMA	LUMINOSIDADE MÍNIMA
1	fio azul e branco com verde	7	24
2	fio verde	10	14
3	fio branco	4	8
4	fio branco com azul	6	12
5	fio esmaltado	6	16

Fonte: Autoria própria.

A Figura 18 e a Figura 19 mostram a bobina primária de fio branco com verde, contendo duas espiras e medindo 6,5 cm de diâmetro. Conectado a um LED médio amarelo de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio azul e branco com verde, que possui 42 espiras e 6,5 cm de diâmetro (mesmo diâmetro que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 1, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 18) e quando se obteve baixa luminosidade do LED (Figura 19).

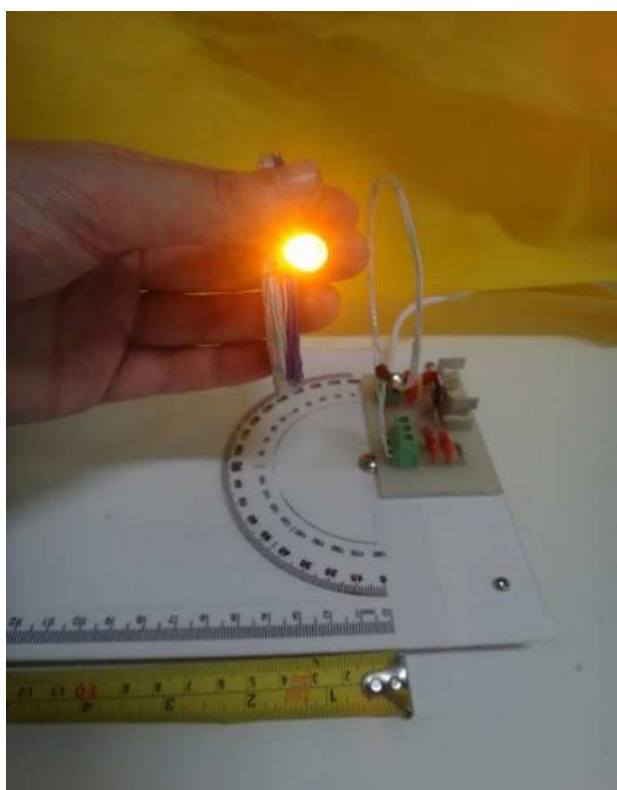


Figura 18 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 1, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.

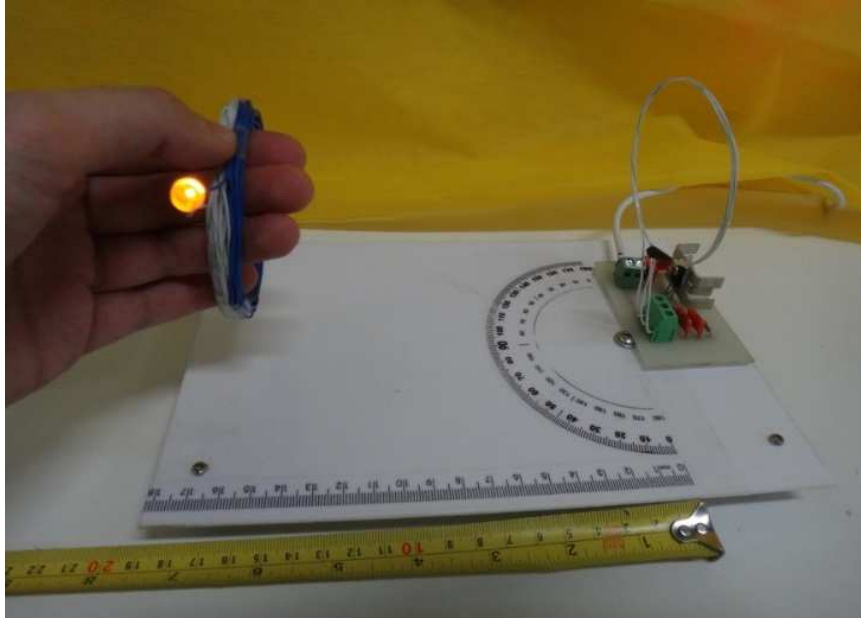


Figura 19 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 1, com luminosidade baixa.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 20 e a Figura 21 mostram a bobina primária também de fio branco com verde, contendo duas espiras e medindo 6,5 cm de diâmetro. Conectado a um LED médio vermelho de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio verde, que possui 25 espiras e 6,5 cm de diâmetro (mesmo diâmetro que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 2, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 20) e quando se obteve mínima luminosidade do LED (Figura 21).

A Figura 22 e a Figura 23 mostram a bobina primária também de fio branco com verde, contendo duas espiras e medindo 6,5 cm de diâmetro. Conectado a um LED simples médio vermelho, tem-se a bobina secundária de fio branco, que possui 10 espiras e 10 cm de diâmetro (um diâmetro maior que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 3, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 22) e quando se obteve mínima luminosidade do LED (Figura 23).

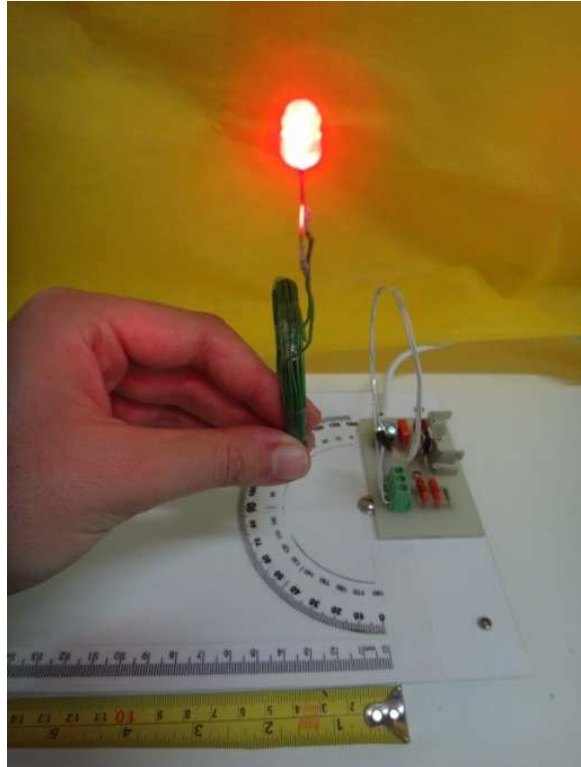


Figura 20 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 2, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.

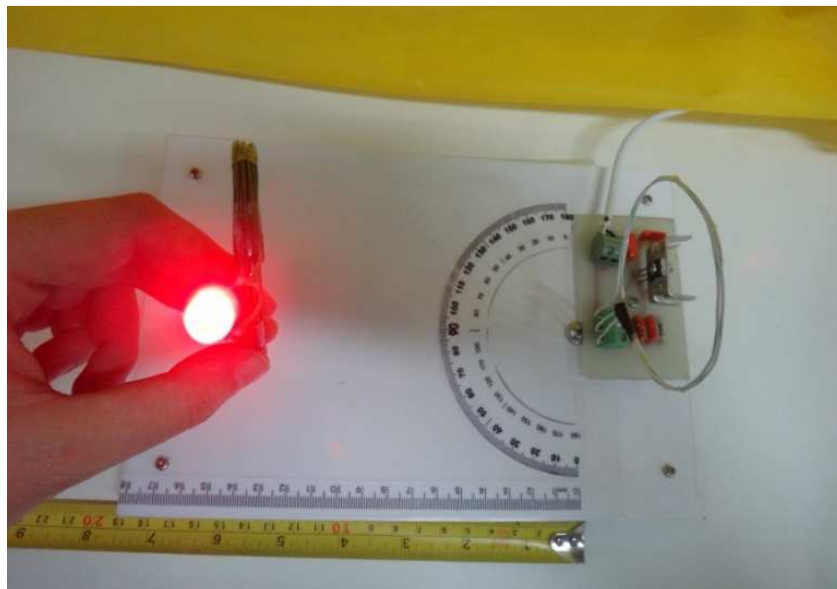


Figura 21 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 2, com luminosidade mínima.
Fonte: Autoria própria.

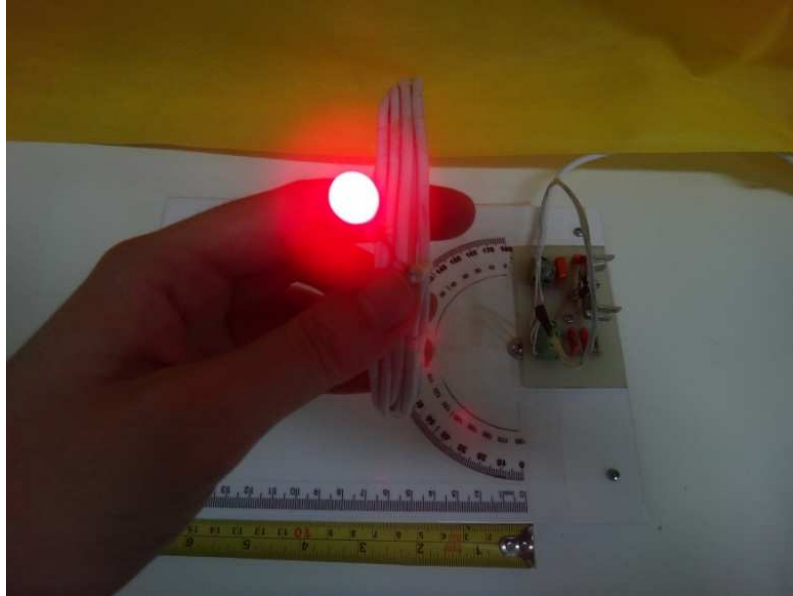


Figura 22 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 3, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.

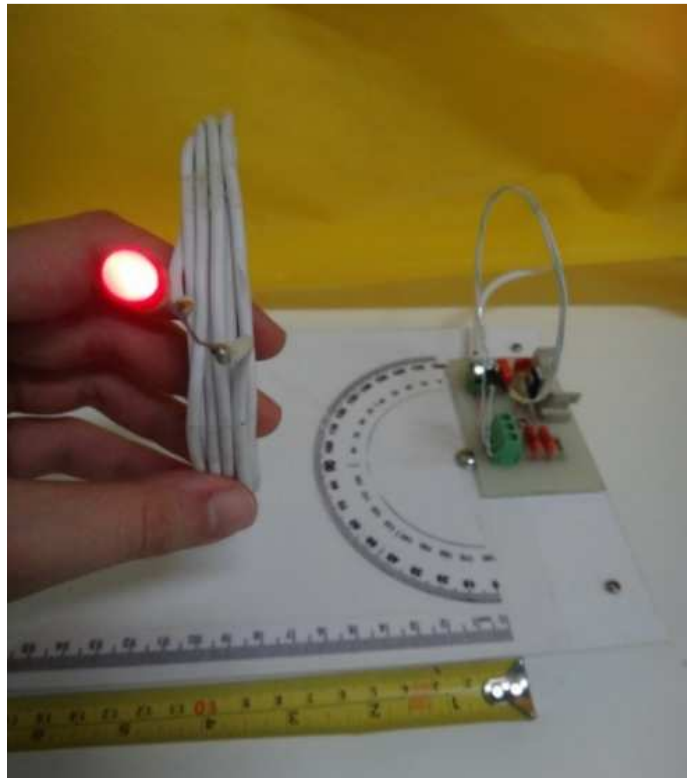


Figura 23 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 3, com luminosidade mínima.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 24 e a Figura 25 mostram a bobina primária também de fio branco com verde, contendo duas espiras e medindo 6,5 cm de diâmetro. Conectado a um LED médio branco de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio branco com azul, que possui 27 espiras e 5 cm de diâmetro (um diâmetro menor que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 4, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 24) e quando se obteve mínima luminosidade do LED (Figura 25).

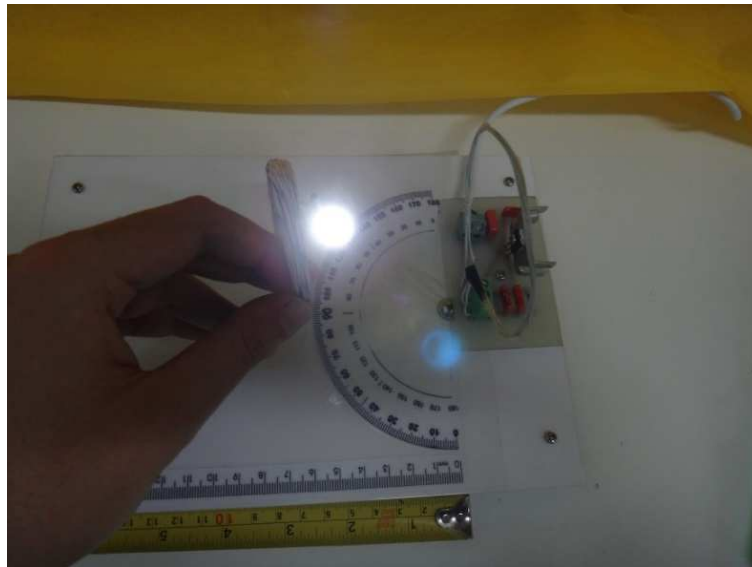


Figura 24 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 4, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.



Figura 25 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 4, com luminosidade mínima.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 26 e a Figura 27 mostram a bobina primária também de fio branco com verde, contendo duas espiras e medindo 6,5 cm de diâmetro. Conectado a um LED grande amarelo de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio esmaltado, que possui 30 espiras e 7,5 cm de diâmetro (um diâmetro maior que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 5, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 26) e quando se obteve baixa luminosidade do LED (Figura 27).

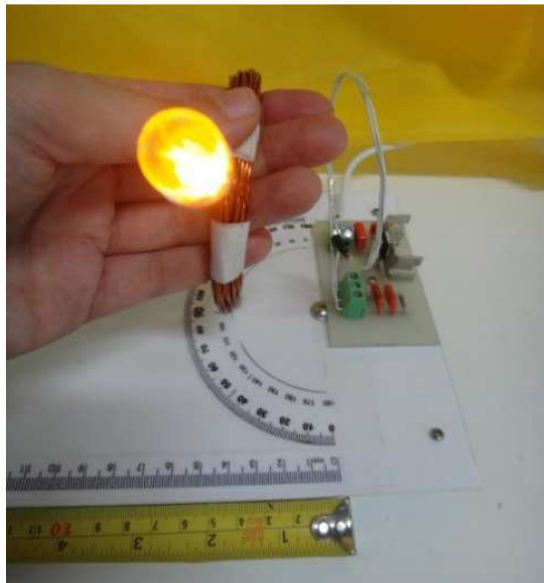


Figura 26 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 5, com luminosidade máxima.

Fonte: Autoria própria.

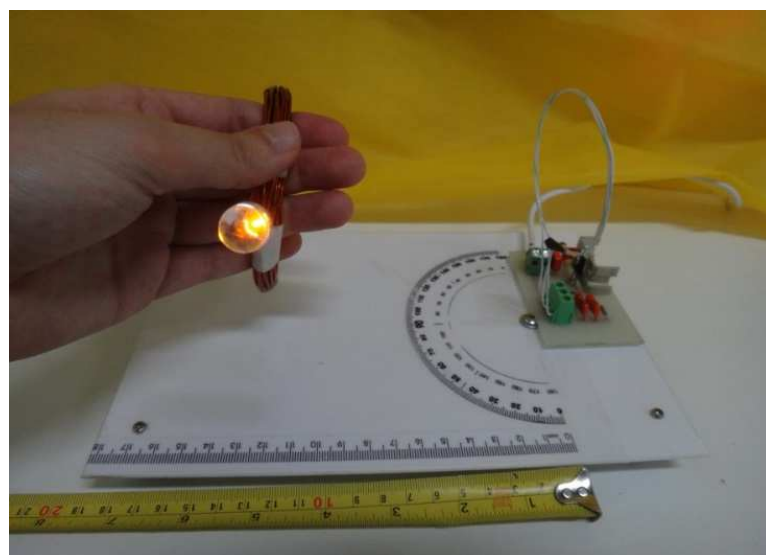


Figura 27 – Bobina primária de fio branco com verde na situação 5, com luminosidade baixa.

Fonte: Autoria própria.

As Figuras 28 a 36 são fotos das situações relacionadas na Tabela 4 (ao se utilizar a bobina primária de fio branco).

Tabela 4 – Teste experimental com a bobina primária de fio branco.

Com bobina primária de fio branco:			
SITUAÇÃO	BOBINA SECUNDÁRIA	DISTÂNCIAS (cm)	
		LUMINOSIDADE MÁXIMA	LUMINOSIDADE MÍNIMA
1	fio azul e branco com verde	7	24
2	fio verde	10	14
3	fio branco	5	10
4	fio branco com azul	7	12
5	fio esmaltado	8	31

Fonte: Autoria própria.

A Figura 28 e a Figura 29 mostram a bobina primária de fio branco, contendo duas espiras e medindo 10 cm de diâmetro. Conectado a um LED médio amarelo de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio azul e branco com verde, que possui 42 espiras e 6,5 cm de diâmetro (um diâmetro menor que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 1, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 28) e quando se obteve baixa luminosidade do LED (Figura 29).

A Figura 30 e a Figura 31 mostram a bobina primária também de fio branco, contendo duas espiras e medindo 10 cm de diâmetro. Conectado a um LED médio vermelho de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio verde, que possui 25 espiras e 6,5 cm de diâmetro (um diâmetro menor que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 2, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 30) e quando se obteve mínima luminosidade do LED (Figura 31).

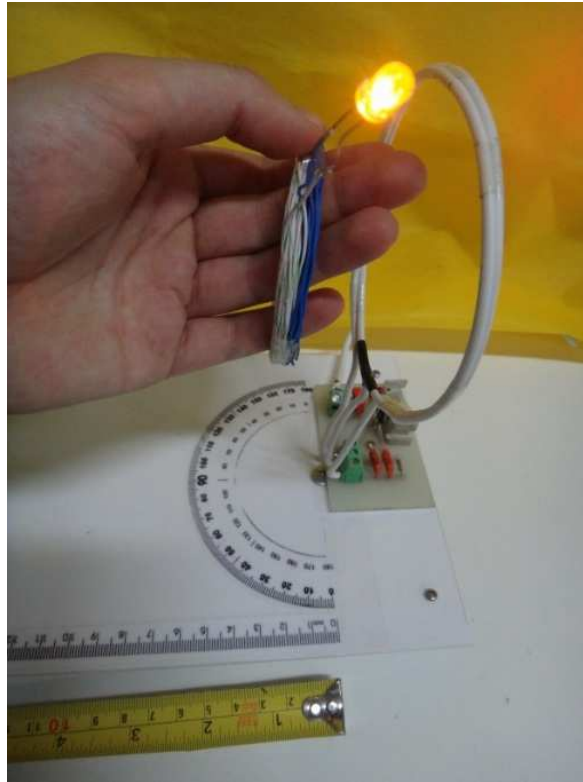


Figura 28 – Bobina primária de fio branco na situação 1, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.

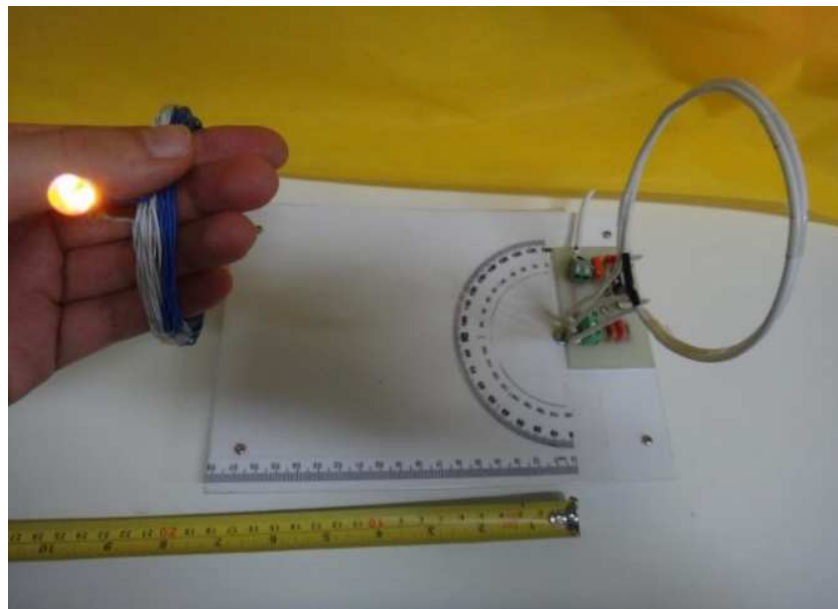


Figura 29 – Bobina primária de fio branco na situação 1, com luminosidade baixa.
Fonte: Autoria própria.

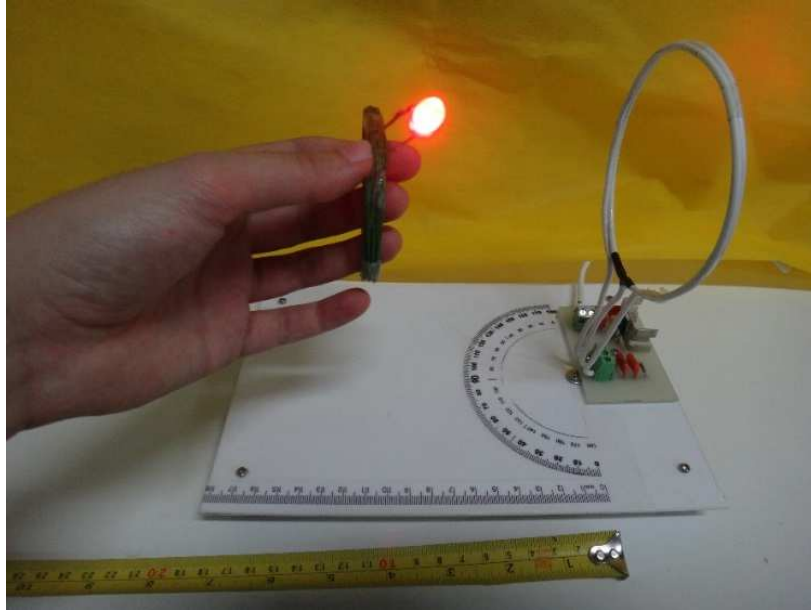


Figura 30 – Bobina primária de fio branco na situação 2, com luminosidade máxima.
 Fonte: Autoria própria.

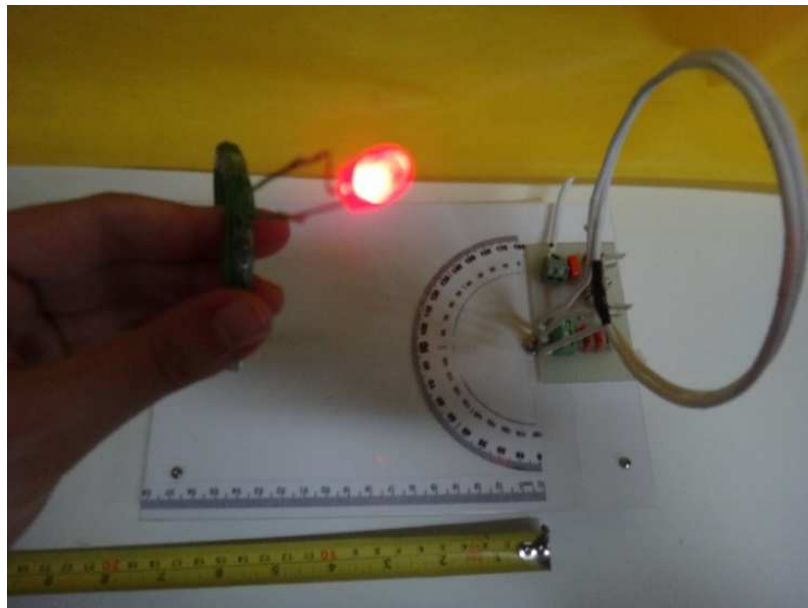
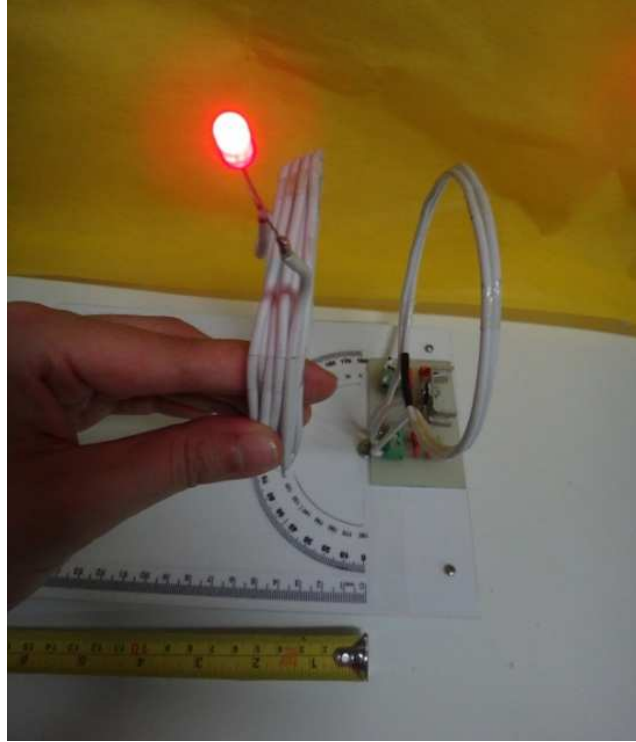


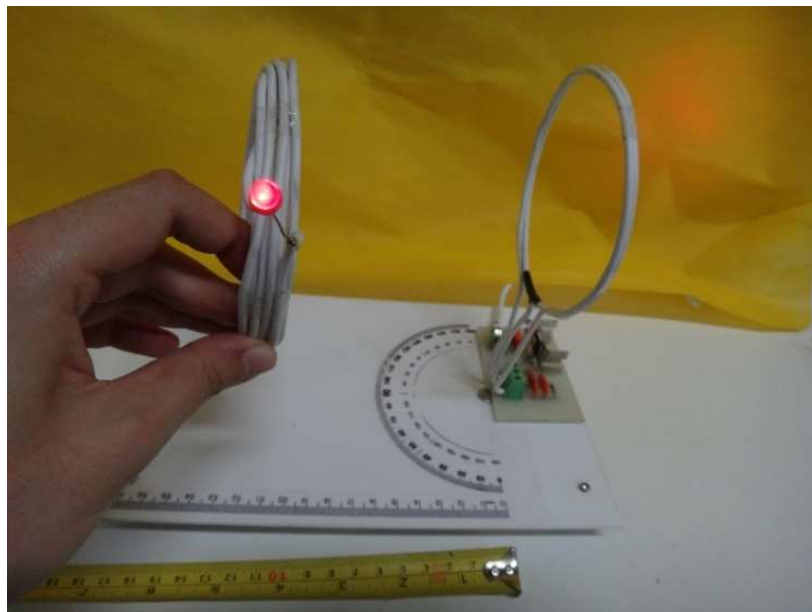
Figura 31 – Bobina primária de fio branco na situação 2, com luminosidade mínima.
 Fonte: Autoria própria.

A Figura 32 e a Figura 33 mostram a bobina primária também de fio branco, contendo duas espiras e medindo 10 cm de diâmetro. Conectado a um LED médio vermelho de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio branco, que possui 10 espiras e 10 cm de diâmetro (mesmo diâmetro que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 3, fotografada quando se obteve máxima

luminosidade do LED (Figura 32) e quando se obteve mínima luminosidade do LED (Figura 33).



**Figura 32 – Bobina primária de fio branco na situação 3, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.**



**Figura 33 – Bobina primária de fio branco na situação 3, com luminosidade mínima.
Fonte: Autoria própria.**

A Figura 34 e a Figura 35 mostram a bobina primária também de fio branco, contendo duas espiras e medindo 10 cm de diâmetro. Conectado a um LED médio branco de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio branco com azul, que possui 27 espiras e 5 cm de diâmetro (um diâmetro menor que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 4, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 34) e quando se obteve mínima luminosidade do LED (Figura 35).

A Figura 36 e a Figura 37 mostram a bobina primária também de fio branco, contendo duas espiras e medindo 10 cm de diâmetro. Conectado a um LED grande amarelo de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio esmaltado, que possui 30 espiras e 7,5 cm de diâmetro (um diâmetro menor que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 5, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 36) e quando se obteve baixa luminosidade do LED (Figura 37).

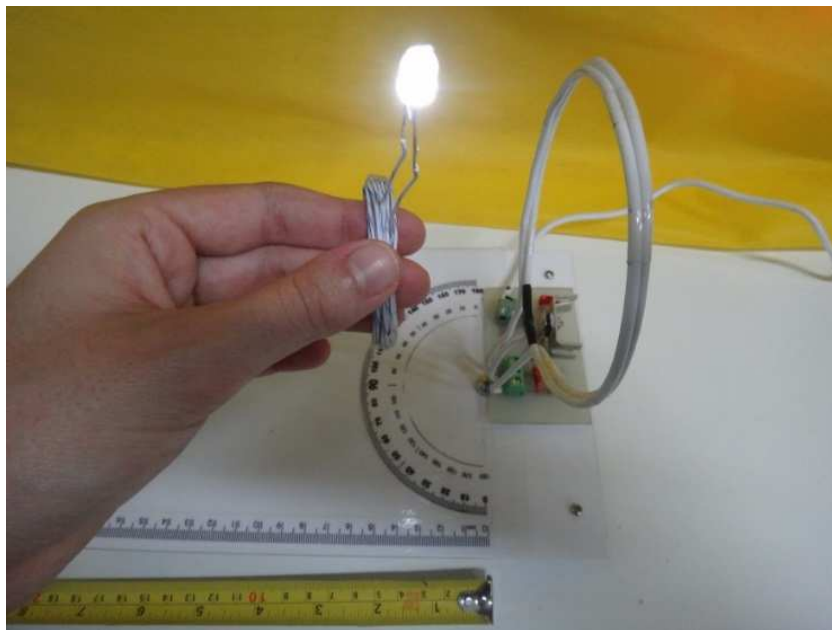


Figura 34 – Bobina primária de fio branco na situação 4, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.

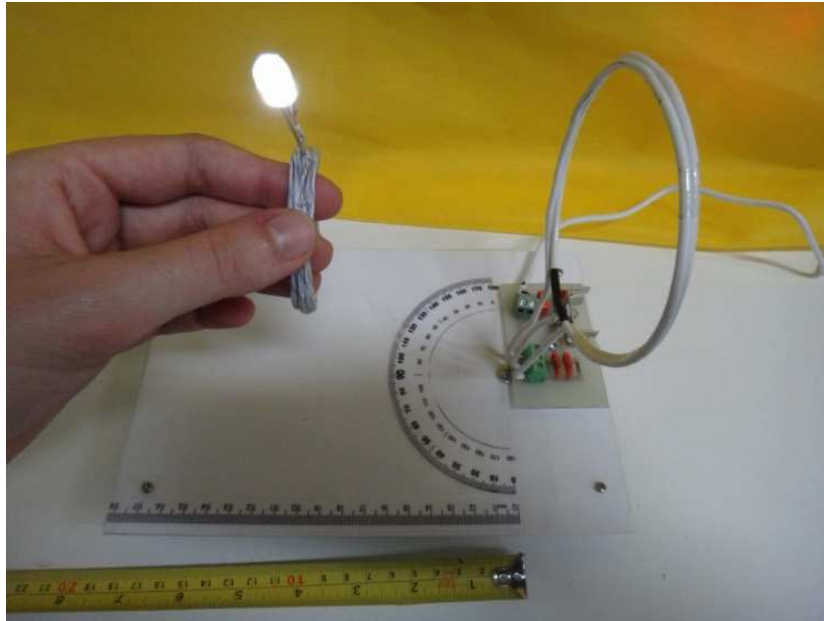


Figura 35 – Bobina primária de fio branco na situação 4, com luminosidade mínima.
Fonte: Autoria própria.

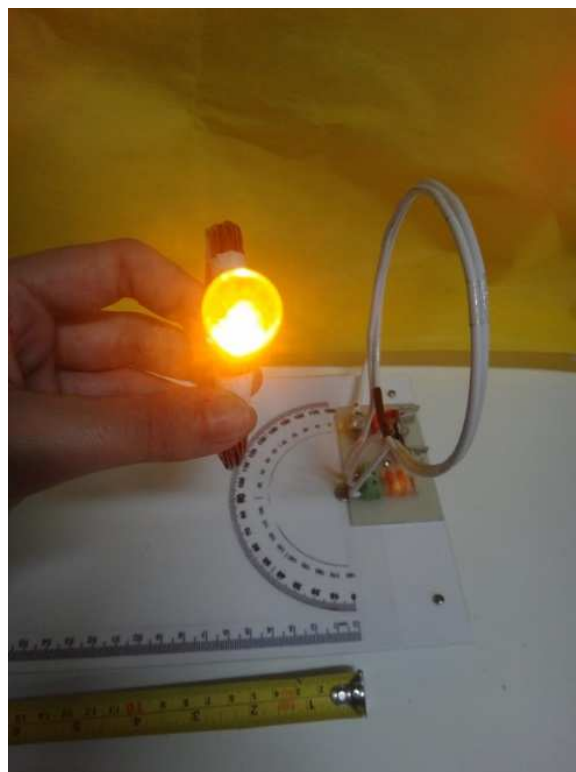


Figura 36 – Bobina primária de fio branco na situação 5, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.

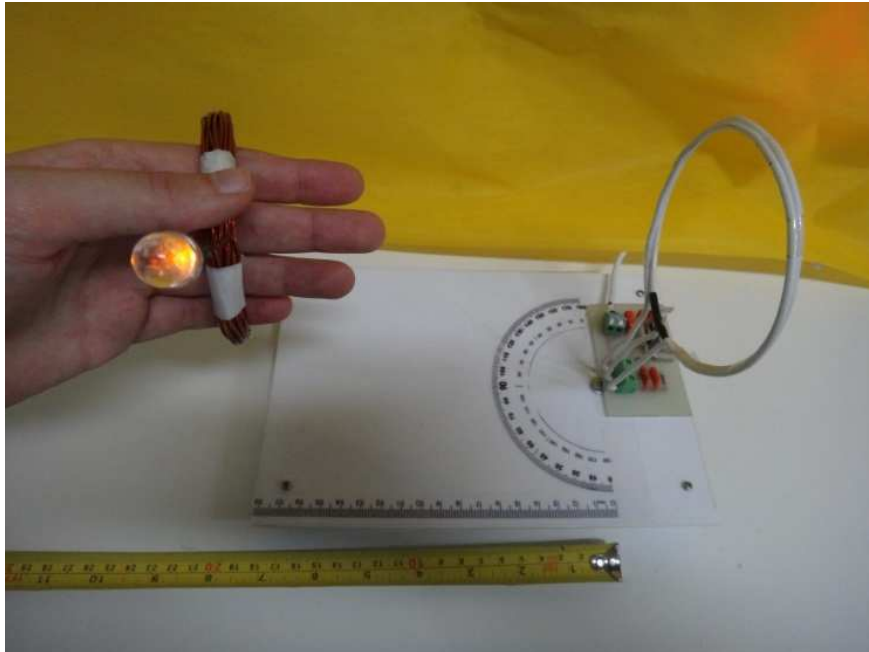


Figura 37 – Bobina primária de fio branco na situação 5, com luminosidade baixa.
Fonte: Autoria própria.

As Figuras 39 a 46 são fotos das situações relacionadas na Tabela 5 (ao se utilizar a bobina primária de fio branco com azul).

Tabela 5 – Teste experimental com a bobina primária de fio branco com azul.

Com bobina primária de fio branco com azul:			
SITUAÇÃO	BOBINA SECUNDÁRIA	DISTÂNCIAS (cm)	
		LUMINOSIDADE MÁXIMA	LUMINOSIDADE MÍNIMA
1	fio azul e branco com verde	5	14
2	fio verde	10	14
3	fio branco	3	6
4	fio branco com azul	5	13
5	fio esmaltado	4	10

Fonte: Autoria própria.

A Figura 39 e a Figura 38 mostram a bobina primária de fio branco com verde, contendo duas espiras e medindo 5 cm de diâmetro. Conectado a um LED médio amarelo de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio azul e branco com verde, que possui 42 espiras e 6,5 cm de diâmetro (um diâmetro maior que o da

bobina primária). Essa situação foi denominada situação 1, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 39) e quando se obteve baixa luminosidade do LED (Figura 38).

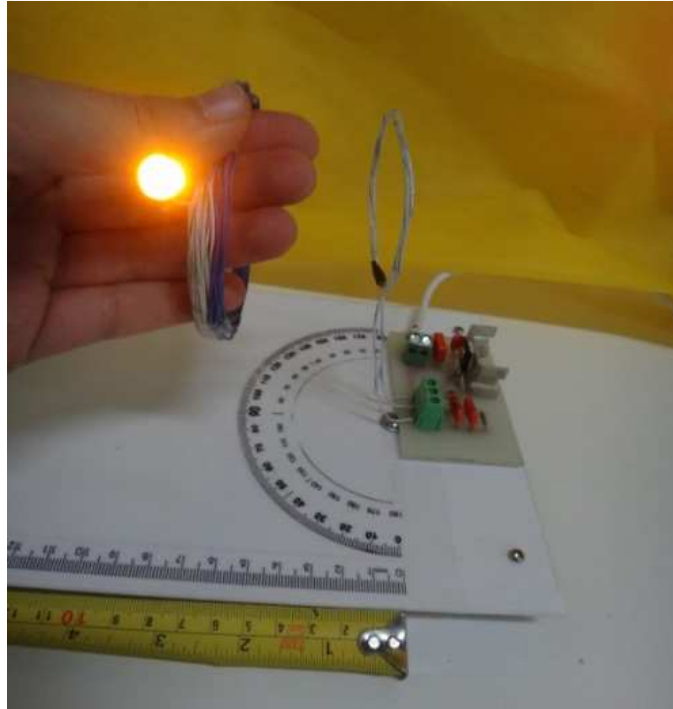


Figura 38 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 1, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.

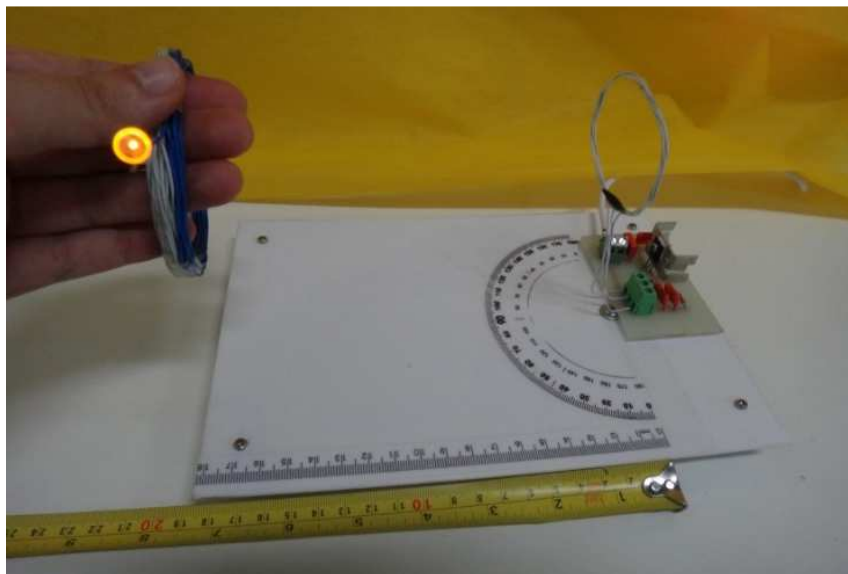
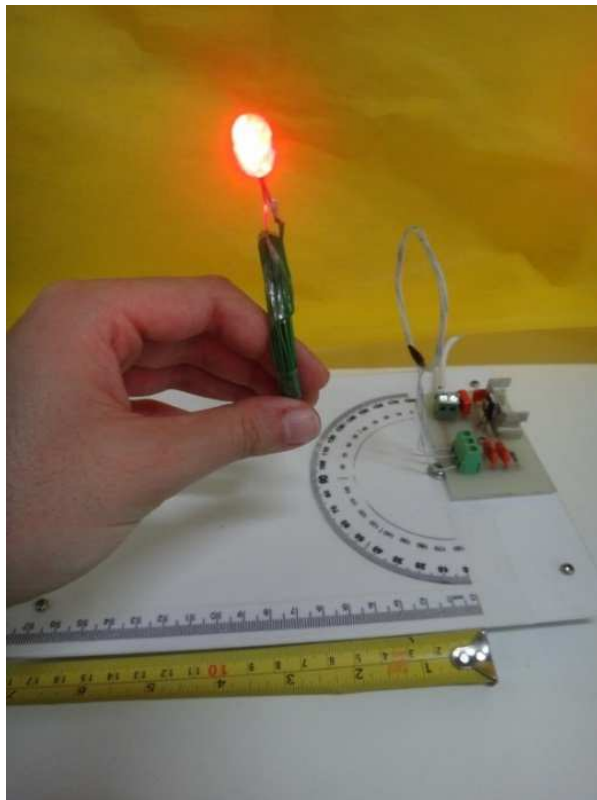


Figura 39 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 1, com luminosidade mínima.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 40 e a Figura 41 mostram a bobina primária também de fio branco com verde, contendo duas espiras e medindo 5 cm de diâmetro. Conectado a um LED médio vermelho de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio verde, que possui 25 espiras e 6,5 cm de diâmetro (um diâmetro maior que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 2, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 40) e quando se obteve mínima luminosidade do LED (Figura 41).

A Figura 43 e a Figura 42 mostram a bobina primária também de fio branco com verde, contendo duas espiras e medindo 5 cm de diâmetro. Conectado a um LED simples médio vermelho, tem-se a bobina secundária de fio branco, que possui 10 espiras e 10 cm de diâmetro (um diâmetro maior que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 3, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 43) e quando se obteve mínima luminosidade do LED (Figura 42).



**Figura 40 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 2, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.**

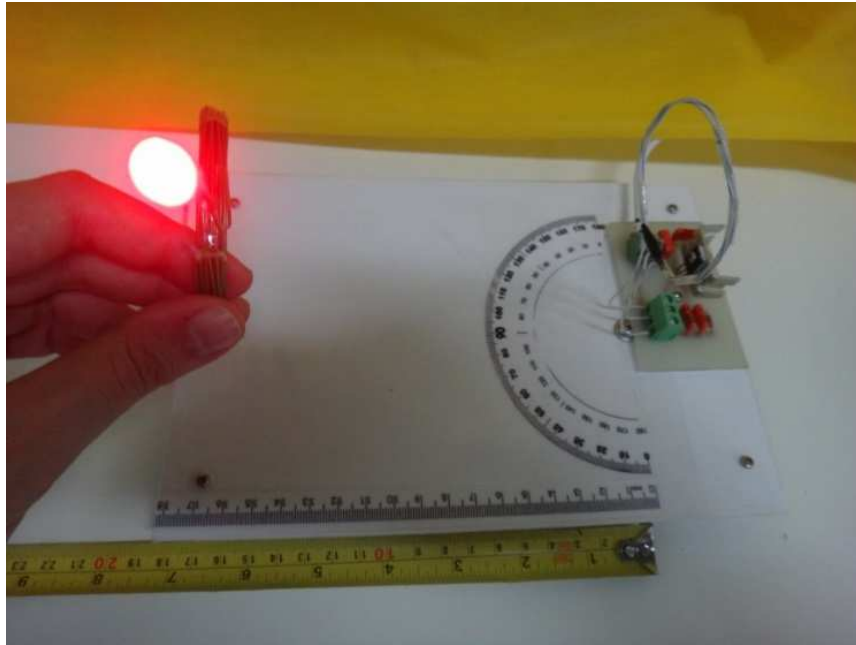


Figura 41 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 2, com luminosidade mínima.
Fonte: Autoria própria.

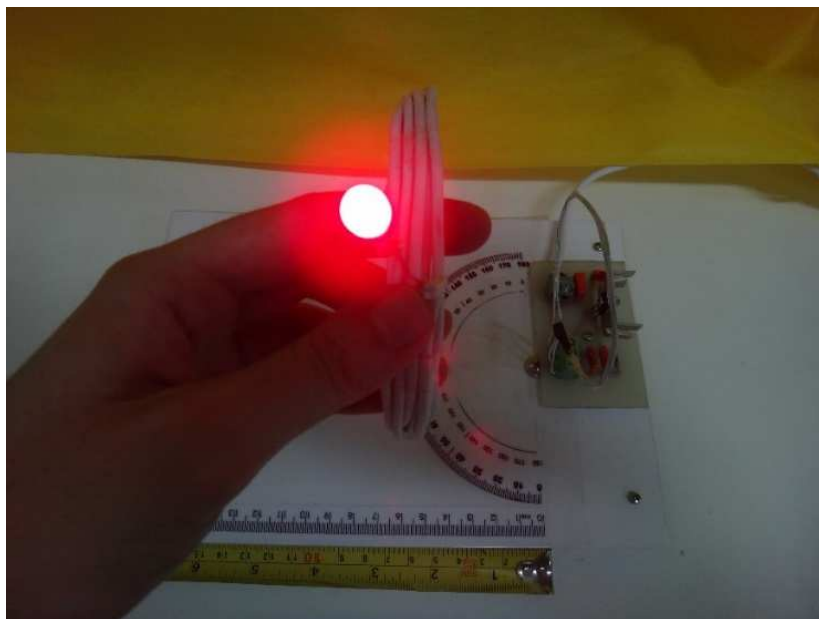


Figura 42 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 3, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.

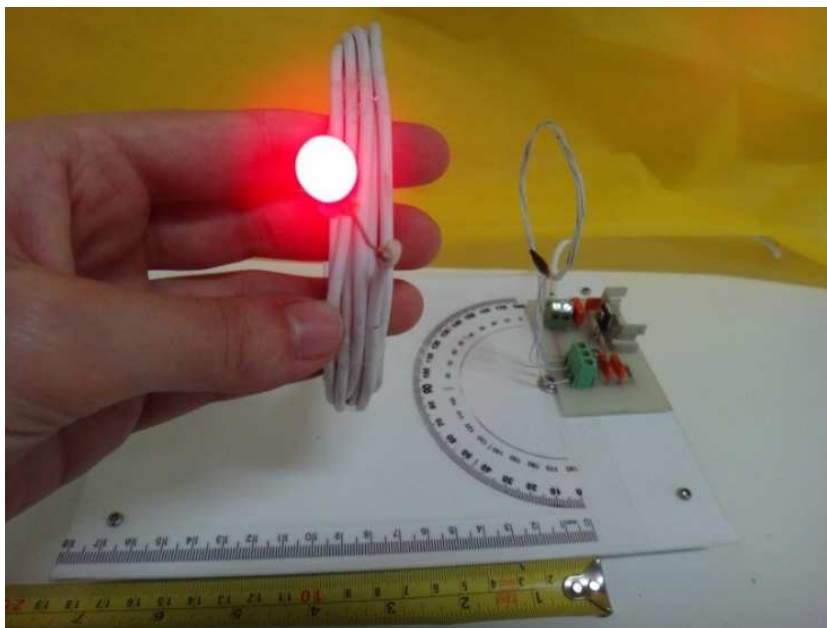


Figura 43 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 3, com luminosidade mínima.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 44 e a Figura 45 mostram a bobina primária também de fio branco com verde, contendo duas espiras e medindo 5 cm de diâmetro. Conectado a um LED médio branco de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio branco com azul, que possui 27 espiras e 5 cm de diâmetro (mesmo diâmetro que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 4, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 44) e quando se obteve mínima luminosidade do LED (Figura 45).

A Figura 46 e a Figura 47 mostram a bobina primária também de fio branco com verde, contendo duas espiras e medindo 5 cm de diâmetro. Conectado a um LED grande amarelo de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio esmaltado, que possui 30 espiras e 7,5 cm de diâmetro (um diâmetro maior que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 5, fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 47) e quando se obteve baixa luminosidade do LED (Figura 46).

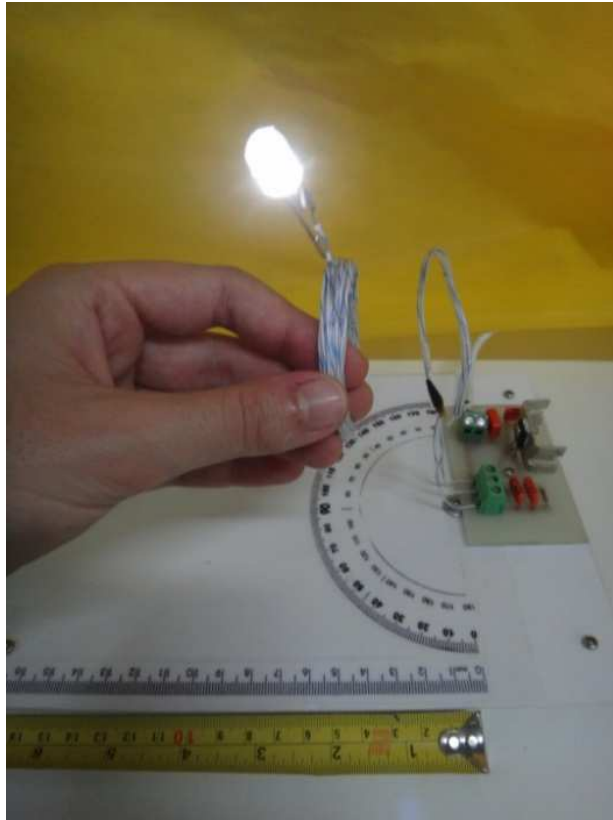


Figura 44 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 4, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.

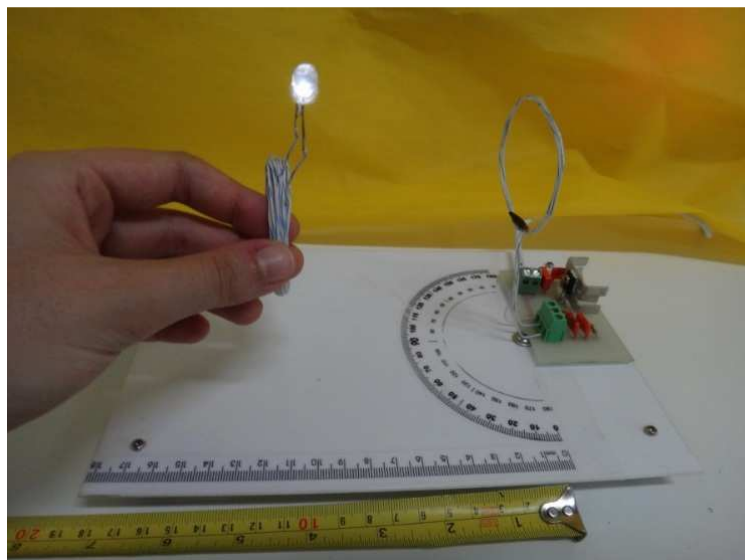


Figura 45 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 4, com luminosidade mínima.
Fonte: Autoria própria.

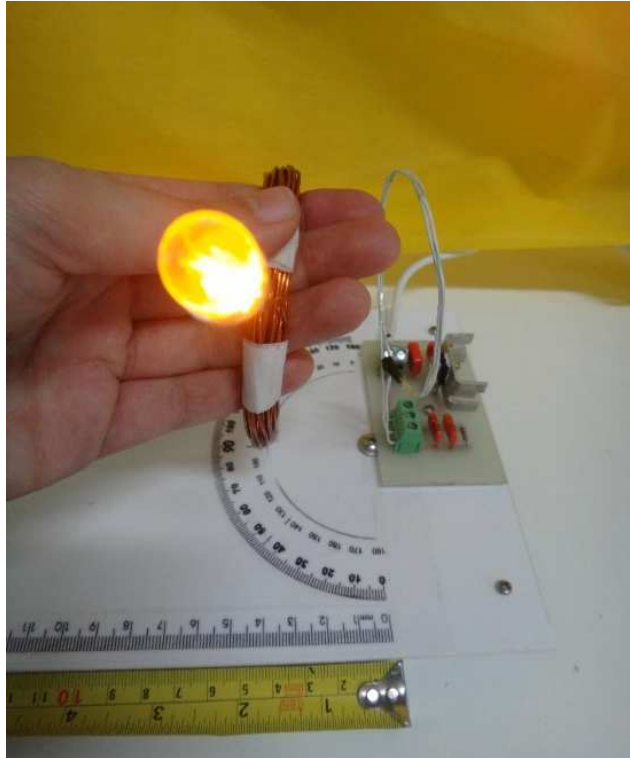


Figura 46 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 5, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.

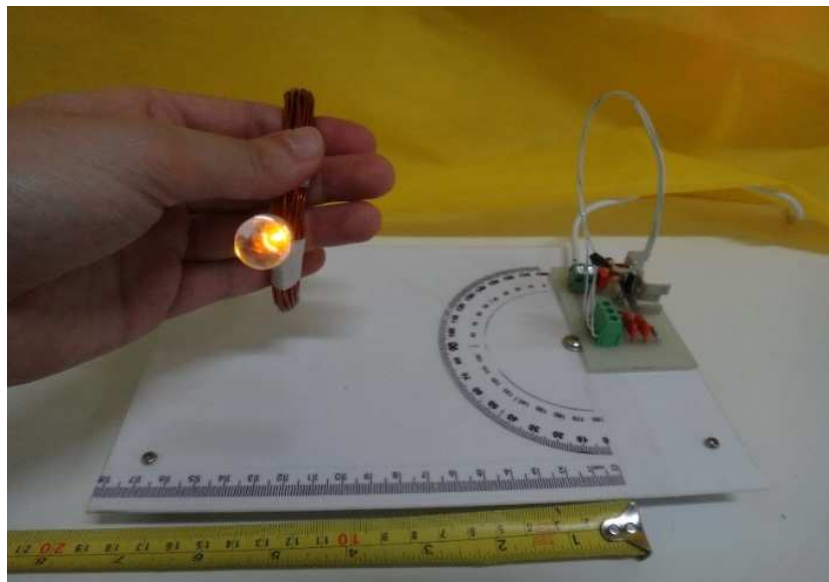


Figura 47 – Bobina primária de fio branco com azul na situação 5, com luminosidade mínima.
Fonte: Autoria própria.

As Figuras 49 a 55 são fotos das situações relacionadas na Tabela 6 (ao se utilizar a bobina primária de fio esmaltado).

Tabela 6 – Teste experimental com a bobina primária de fio esmaltado.

Com bobina primária de fio esmaltado:			
SITUAÇÃO	BOBINA SECUNDÁRIA	DISTÂNCIAS (cm)	
		LUMINOSIDADE MÁXIMA	LUMINOSIDADE MÍNIMA
1	fio azul e branco com verde	6	27
2	fio verde	15	15
3	fio branco	7	10
4	fio branco com azul	9	13
5	fio esmaltado	10	33

Fonte: Autoria própria.

A Figura 48 e a Figura 49 mostram a bobina primária de fio esmaltado, contendo duas espiras e medindo 7,5 cm de diâmetro. Conectado a um LED médio amarelo de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio azul e branco com verde, que possui 42 espiras e 6,5 cm de diâmetro (um diâmetro menor que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 1. Essa situação 1 foi fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 48) e quando se obteve baixa luminosidade do LED (Figura 49).

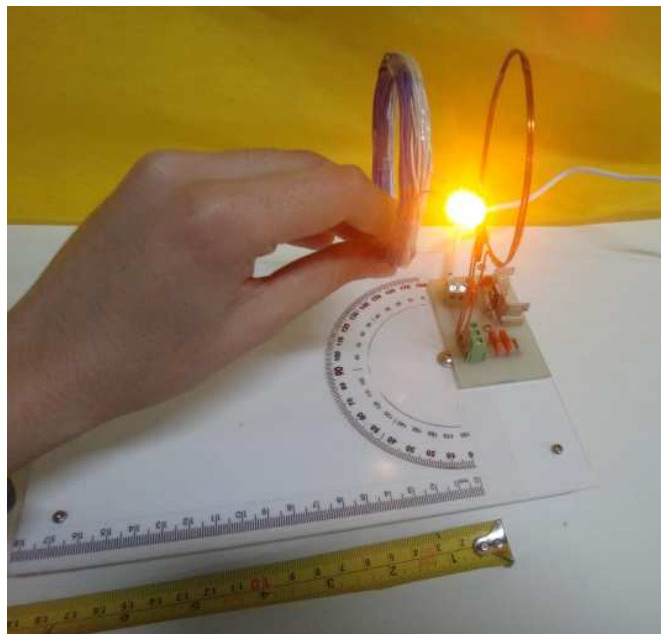


Figura 48 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 1, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.

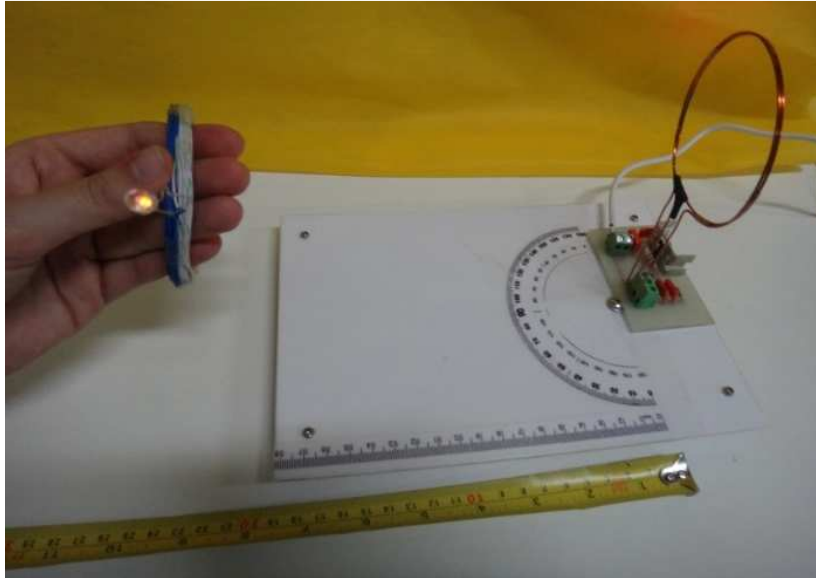


Figura 49 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 1, com luminosidade baixa.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 50 mostra a bobina primária também de fio esmaltado, contendo duas espiras e medindo 7,5 cm de diâmetro. Conectado a um LED médio vermelho de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio verde, que possui 25 espiras e 6,5 cm de diâmetro (um diâmetro menor que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 3.

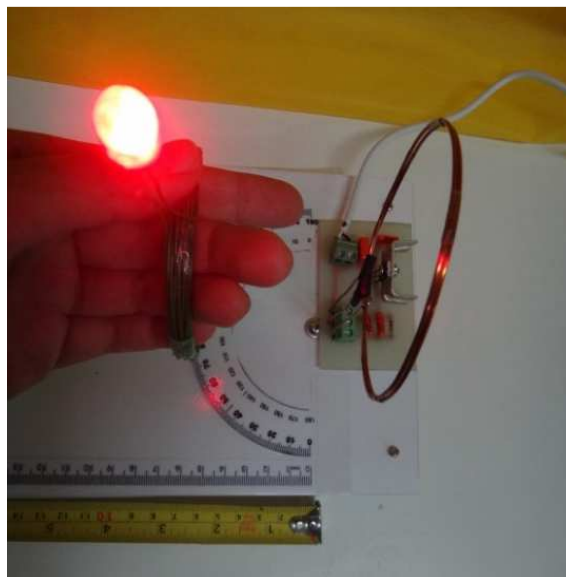
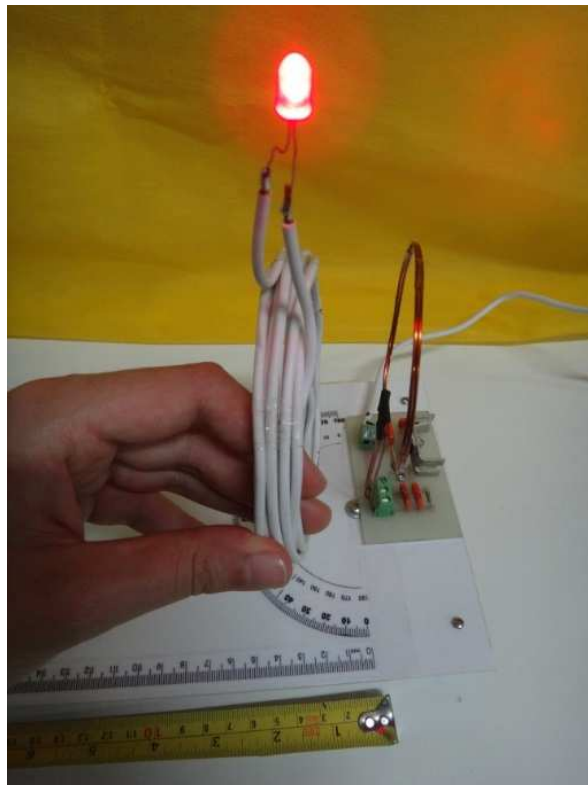


Figura 50 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 2, com luminosidade média.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 51 e a Figura 52 mostram a bobina primária também de fio esmaltado, contendo duas espiras e medindo 7,5 cm de diâmetro. Conectado a um LED simples médio vermelho, tem-se a bobina secundária de fio branco, que possui 10 espiras e 10 cm de diâmetro (um diâmetro maior que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 3. Essa situação 3 foi fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 51) e quando se obteve mínima luminosidade do LED (Figura 52).

A Figura 53 e a Figura 54 mostram a bobina primária também de fio esmaltado, contendo duas espiras e medindo 7,5 cm de diâmetro. Conectado a um LED médio branco de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio branco com azul, que possui 27 espiras e 5 cm de diâmetro (um diâmetro menor que o da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 4. Essa situação 4 foi fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 53) e quando se obteve mínima luminosidade do LED (Figura 54).



**Figura 51 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 3, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.**

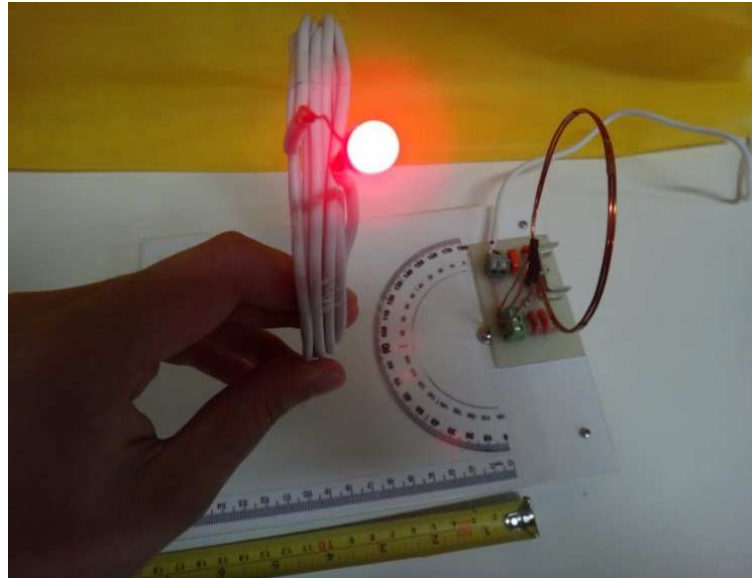


Figura 52 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 3, com luminosidade mínima.
Fonte: Autoria própria.

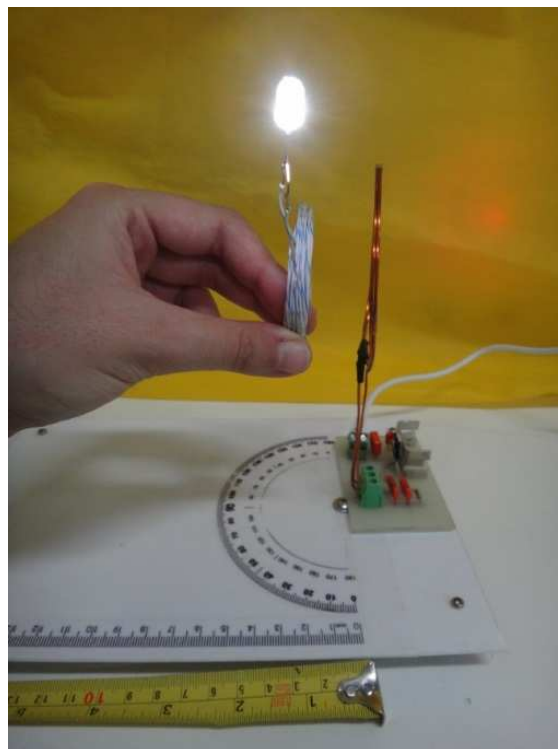


Figura 53 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 4, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.

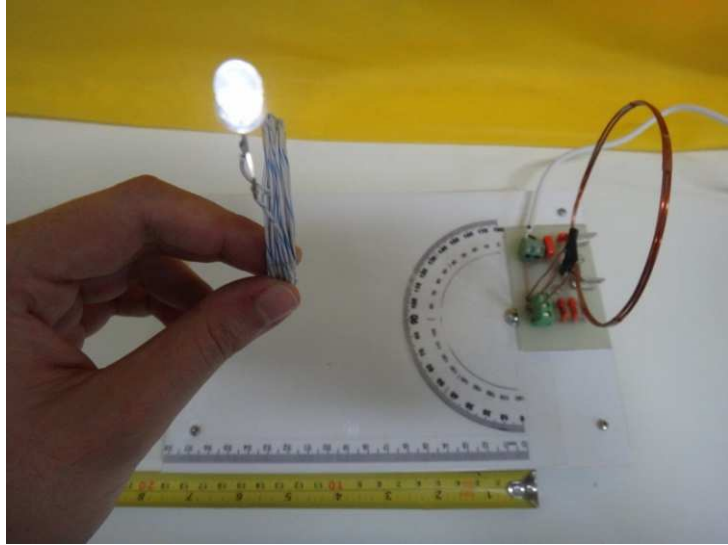


Figura 54 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 4, com luminosidade mínima.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 55 e a Figura 56 mostram a bobina primária também de fio esmaltado, contendo duas espiras e medindo 7,5 cm de diâmetro. Conectado a um LED grande amarelo de alta intensidade, tem-se a bobina secundária de fio esmaltado, que possui 30 espiras e 7,5 cm de diâmetro (um diâmetro igual ao da bobina primária). Essa situação foi denominada situação 5. Essa situação 5 foi fotografada quando se obteve máxima luminosidade do LED (Figura 55) e quando se obteve baixa luminosidade do LED (Figura 56).

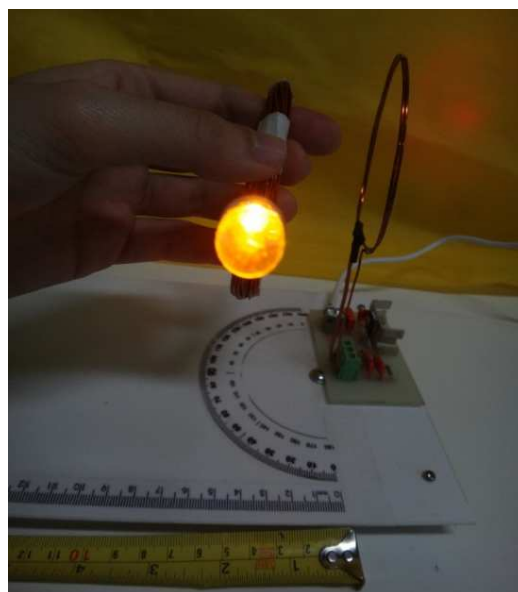
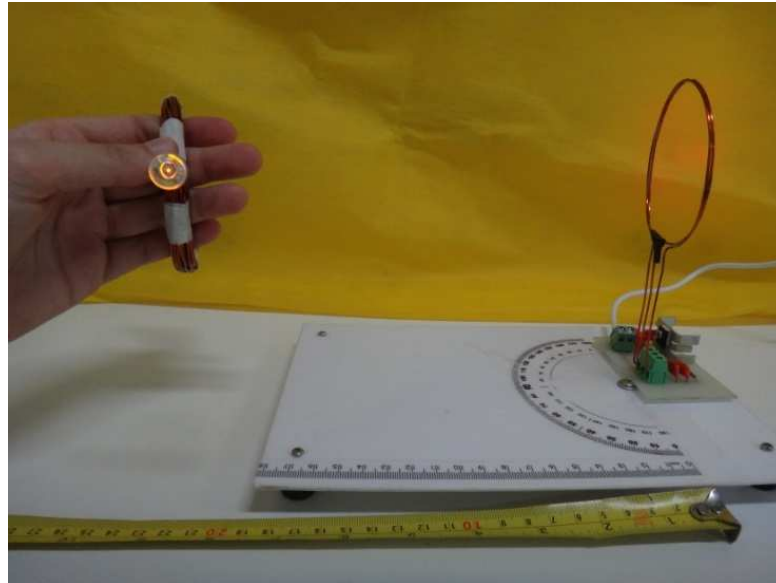


Figura 55 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 5, com luminosidade máxima.
Fonte: Autoria própria.



**Figura 56 – Bobina primária de fio esmaltado na situação 5, com luminosidade baixa.
Fonte: Autoria própria.**

3.4 CONTINUIDADE DA PESQUISA

Ao estudar a fundamentação teórica (Capítulo 2), também foi possível compreender o funcionamento do circuito magneticamente acoplado e o comportamento das bobinas primária e secundária a partir do software PSpice.

Seguindo o modelo utilizado por Gondim (2010) e com o auxílio das explicações mencionadas por Hayt Junior (2008), foi implementado um circuito para simulação de acordo com os valores dos dispositivos disponíveis no LABSIEE (Laboratório de Segurança Iluminação e Eficiência Energética), localizado na UTFPR de Cornélio Procópio. Este circuito está apresentado na Figura 57.

Essas simulações foram efetuadas não só para uma eventual continuidade do estudo sobre o assunto, mas também para se perceber melhor os valores de tensão e corrente num circuito RLC que tem como objetivo transmitir energia elétrica sem fio, entre os circuitos primário e secundário.

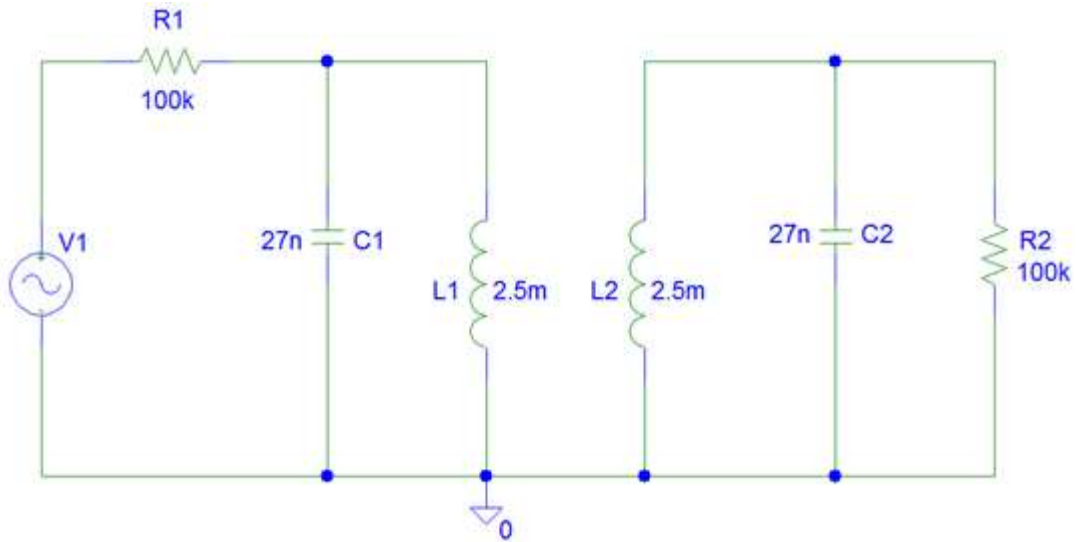


Figura 57 – Circuito analisado em simulação.

Fonte: Autoria própria.

A partir desse circuito inicial (Figura 57), foram encontrados alguns valores de coeficiente de acoplamento (k), para cada valor selecionado da indutância mútua (M) entre as bobinas. Esses valores das indutâncias mútuas foram estipulados em projeto. Para isto, efetuou-se os cálculos com base na Equação 5, apresentada anteriormente no item 2.2.1 (Coeficiente de acoplamento).

Os projetos poderão ser futuramente implementados com o auxílio do que está disposto no Anexo A (Indutância Mútua).

Além disso, foram utilizadas as Equações 12, 13 e 11 para se calcular o coeficiente de acoplamento crítico, conforme os cálculos relacionados a seguir. Substituindo (11) em (13) e aplicando os valores utilizados nas simulações, encontra-se:

$$Q_0 = \frac{R}{\frac{1}{\sqrt{LC}}L} = \frac{100 \cdot 10^3}{\frac{1}{\sqrt{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 27 \cdot 10^{-9}}} 2,5 \cdot 10^{-3}} \cong 328,634 \quad (17)$$

Substituindo esse resultado em (12), obtém-se o valor de $k_{crítico}$:

$$k_{crítico} = \frac{1}{Q_0} = \frac{1}{328,634} = 0,003043$$

De acordo com Gondim (2010), para se encontrar a frequência crítica basta utilizar os seguintes cálculos:

$$f_{crítica} = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (18)$$

Substituindo (11) em (18), tem-se que:

$$f_{crítica} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Portanto,

$$f_{crítica} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 27 \cdot 10^{-9}}} = 19,372 \text{ kHz}$$

Nas simulações apresentadas a seguir é possível observar o local da medição conforme indicado na Figura 58. Assim, nos gráficos, $V(L1:2)$ representa a tensão medida na bobina 1 e $V(L2:2)$ representa a tensão medida na bobina 2. Além disso, $I(L1)$ representa a corrente medida na bobina 1 e $I(L2)$ representa a corrente medida na bobina 2.

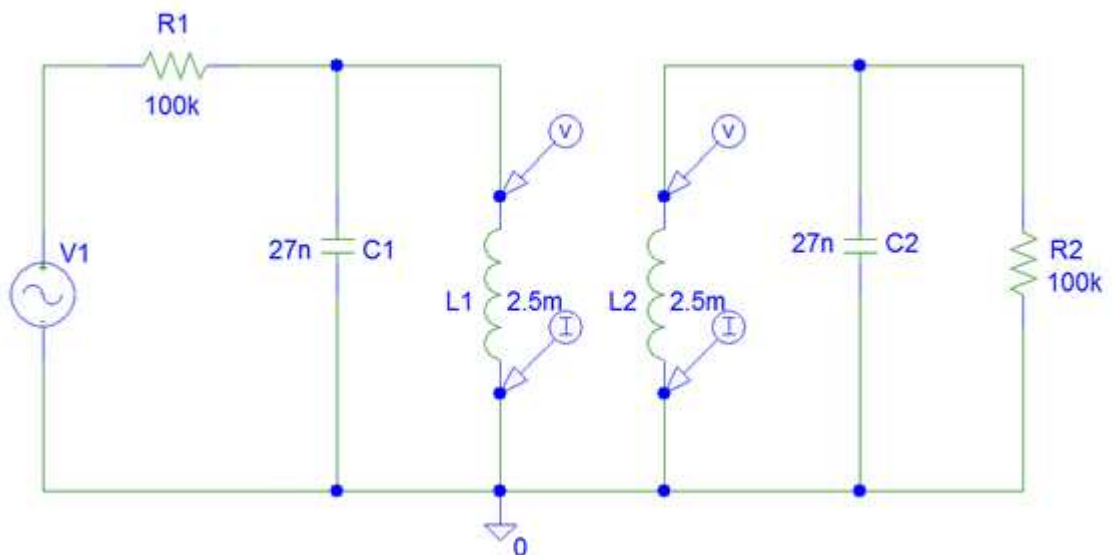


Figura 58 – Circuito analisado em simulação, mostrando onde foram feitas as medições de tensão e corrente.

Fonte: Autoria própria.

3.4.1 Primeira simulação

A primeira simulação efetuada foi realizada com um acoplamento k igual a 0,000439. Este valor foi obtido utilizando-se a Equação 5 para uma indutância mútua (M) de projeto de 1,1 μH . De acordo com o tópico 2.2.1 (Coeficiente de acoplamento), este valor do coeficiente de acoplamento representa um acoplamento subcrítico, pois está abaixo de $k_{\text{critico}} = 0,003043$. O esquema utilizado no software de simulação PSpice Schematics pode ser visto na Figura 59, a seguir.

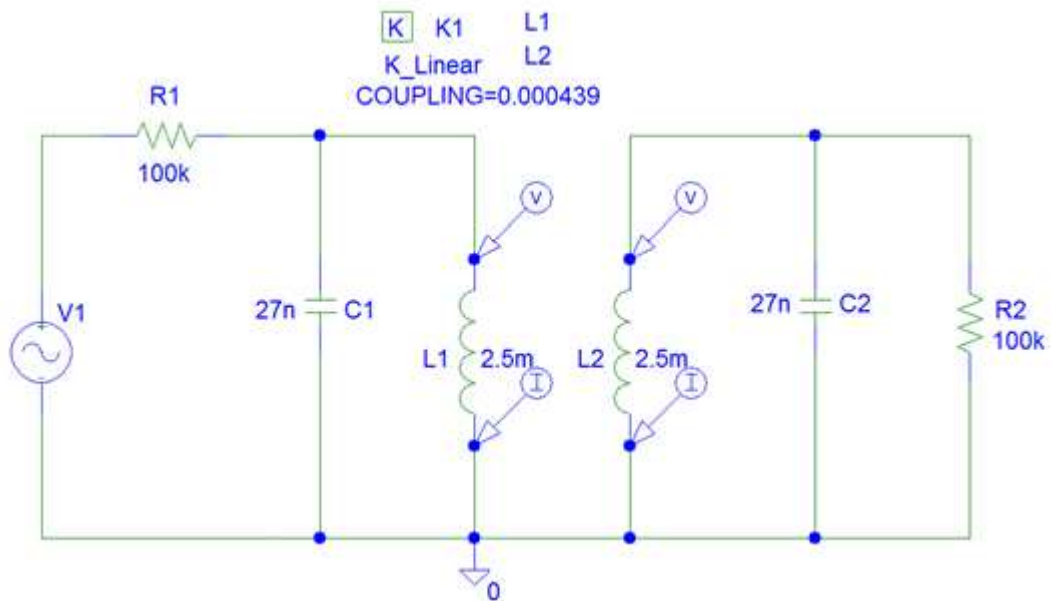


Figura 59 – Circuito analisado em simulação com coeficiente de acoplamento $k=0,000439$.

Fonte: Autoria própria.

Foi possível perceber, conforme o Gráfico 3, que a frequência de ressonância ocorre em aproximadamente 19,37kHz, o que está de acordo com o esperado, pois o resultado encontrado nos cálculos foi $f_{\text{critica}} = 19,372$ kHz.

Os valores de pico da tensão na bobina primária e na bobina secundária, foram de, aproximadamente, 130V e 20V respectivamente. Ou seja, conforme o que foi descrito no tópico 2.2.1 (Coeficiente de acoplamento), pode-se verificar que, por se tratar de um acoplamento subcrítico, a transmissão apresentou baixa eficiência, pois a divergência entre os picos de tensão foi consideravelmente alta.

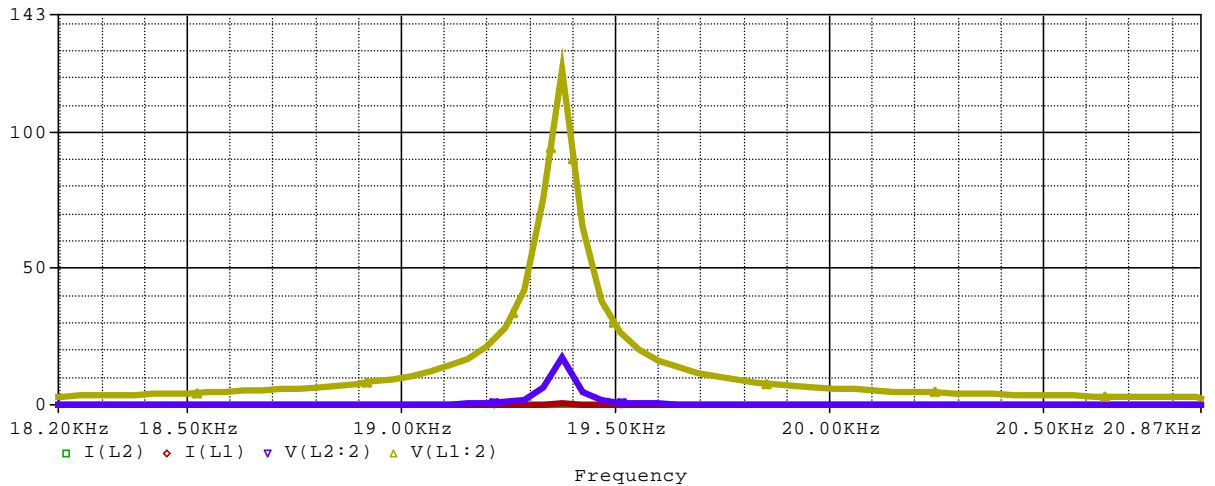


Gráfico 3 – Tensões e correntes versus frequência (análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,000439$).

Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 4, a seguir, destaca as correntes obtidas em simulação. É uma ampliação de um trecho já apresentado no Gráfico 3, porém agora em escala adaptada para uma melhor visualização desta faixa de operação.

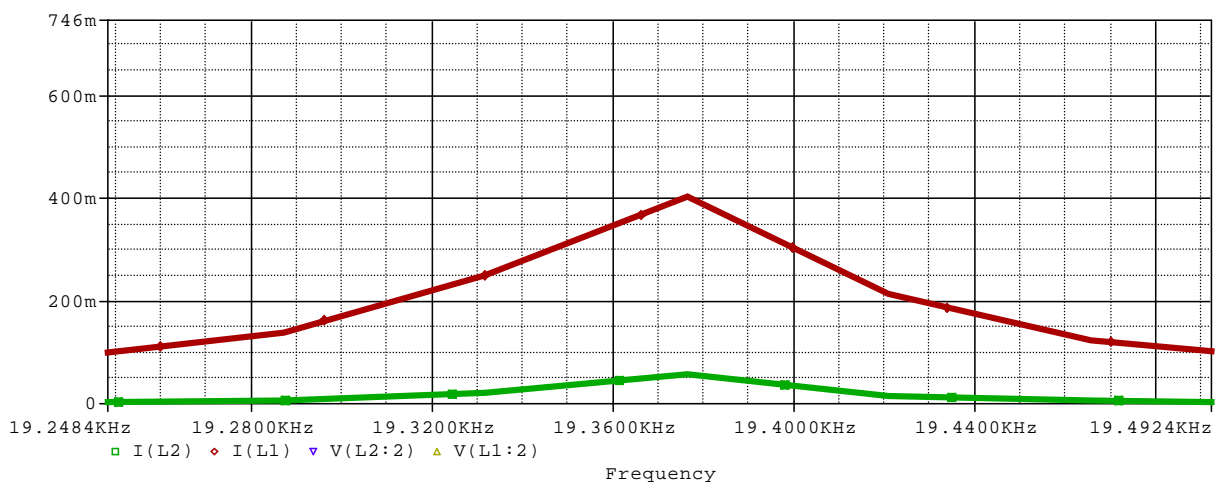


Gráfico 4 – Zoom das correntes versus frequência (detalhe da análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,000439$).

Fonte: Autoria própria.

3.4.2 Segunda simulação

A segunda simulação efetuada foi realizada com um acoplamento k igual a 0,0019. Analogamente, este valor também foi obtido utilizando-se a Equação 5, desta vez para uma indutância mútua (M) de projeto de 4,75 μH . De acordo com o tópico 2.2.1 (Coeficiente de acoplamento), este valor do coeficiente de acoplamento também representa um acoplamento subcrítico, pois ainda está abaixo de $k_{\text{critico}} = 0,003043$. O esquema utilizado no software de simulação PSpice Schematics pode ser visto na Figura 60, a seguir.

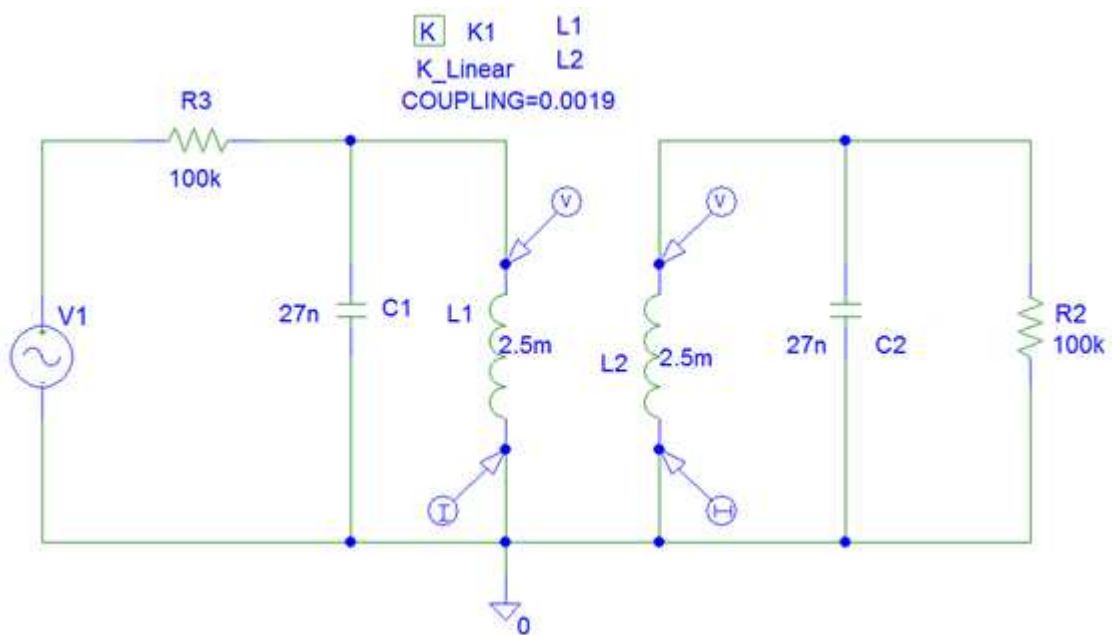


Figura 60 – Circuito analisado em simulação com coeficiente de acoplamento $k=0,0019$.

Fonte: Autoria própria.

Foi possível perceber, conforme o Gráfico 5, que a frequência de ressonância também ocorre em aproximadamente 19,37kHz, o que está de acordo com o esperado, pois o resultado encontrado nos cálculos foi $f_{\text{critica}} = 19,372$ kHz.

Os valores de pico da tensão na bobina primária e na bobina secundária, foram de, aproximadamente, 95V e 60V respectivamente. Ou seja, devido ao aumento do coeficiente de acoplamento, houve uma melhora considerável na eficiência da transmissão, pois a divergência entre os picos de tensão foi bem menor do que o observado na primeira simulação.

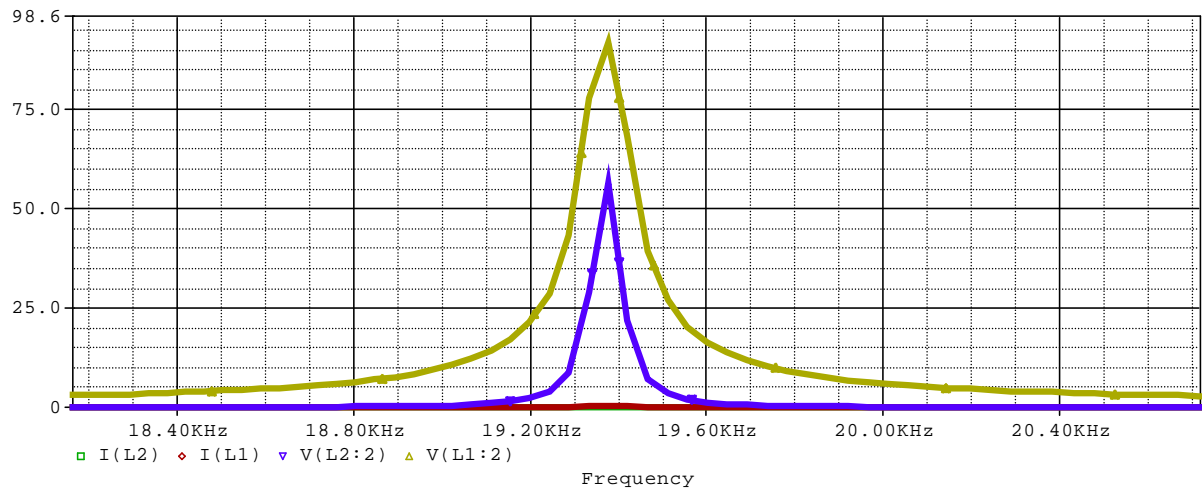


Gráfico 5 – Tensões e correntes versus frequência (análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,0019$).

Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 6, a seguir, destaca as correntes obtidas em simulação. É uma ampliação de um trecho já apresentado no Gráfico 5, porém agora em escala adaptada para uma melhor visualização desta faixa de operação.

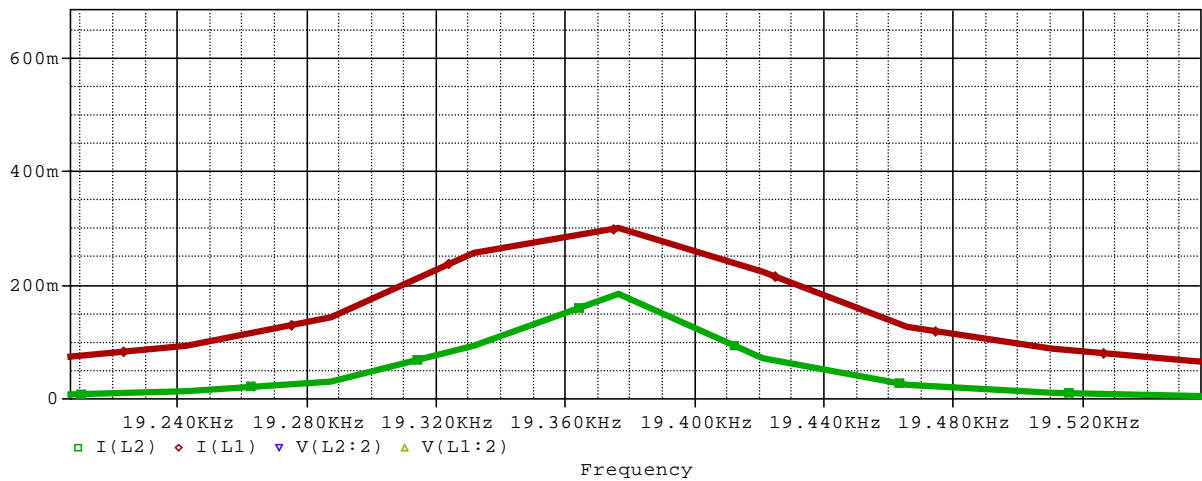


Gráfico 6 – Zoom das correntes versus frequência (detalhe da análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,0019$).

Fonte: Autoria própria.

3.4.3 Terceira simulação

A terceira simulação efetuada foi realizada com um acoplamento k igual a 0,0021. Analogamente, este valor também foi obtido utilizando-se a Equação 5, desta vez para uma indutância mútua (M) de projeto de 5,25 μH . De acordo com o tópico 2.2.1 (Coeficiente de acoplamento), este valor do coeficiente de acoplamento representa mais um acoplamento subcrítico, pois está ainda abaixo de $k_{\text{critico}} = 0,003043$. O esquema utilizado no software de simulação PSpice Schematics pode ser visto na Figura 61, a seguir.

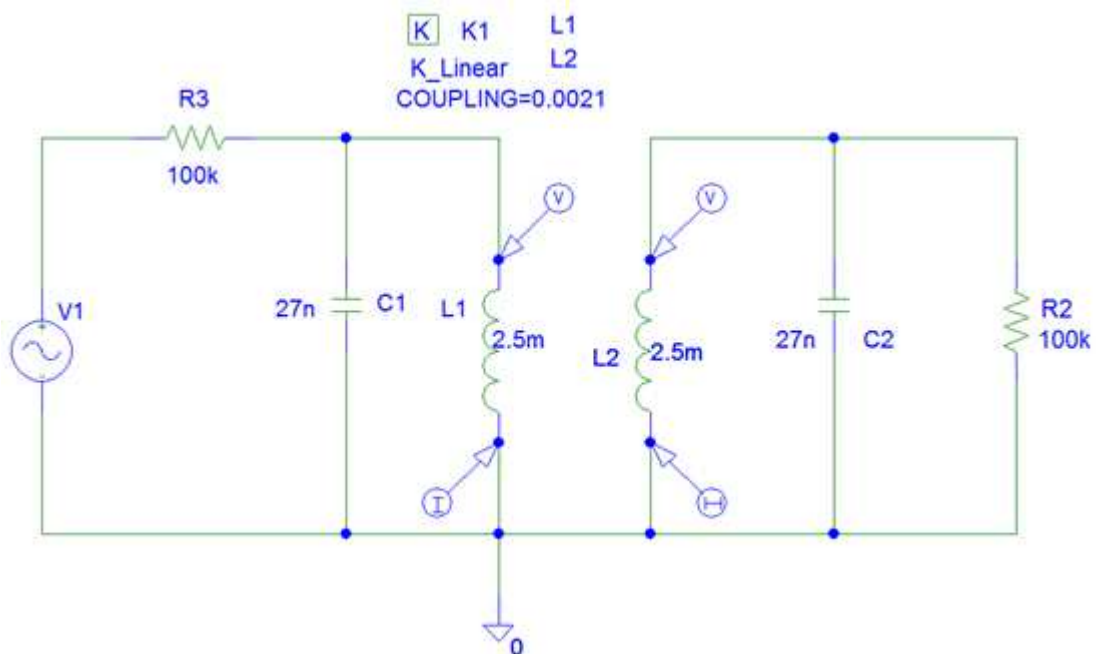


Figura 61 – Circuito analisado em simulação com coeficiente de acoplamento $k=0,0021$.

Fonte: Autoria própria.

Foi possível perceber, conforme o Gráfico 7, que a frequência de ressonância também ocorre em aproximadamente 19,37kHz, o que está de acordo com o esperado, pois o resultado encontrado nos cálculos foi $f_{\text{critica}} = 19,372$ kHz.

Os valores de pico da tensão na bobina primária e na bobina secundária, foram de, aproximadamente, 87V e 65V respectivamente. Ou seja, devido a um ligeiro aumento do coeficiente de acoplamento, ainda houve uma melhora razoável na eficiência da transmissão, pois a divergência entre os picos de tensão continuou menor do que o observado na simulação anterior.

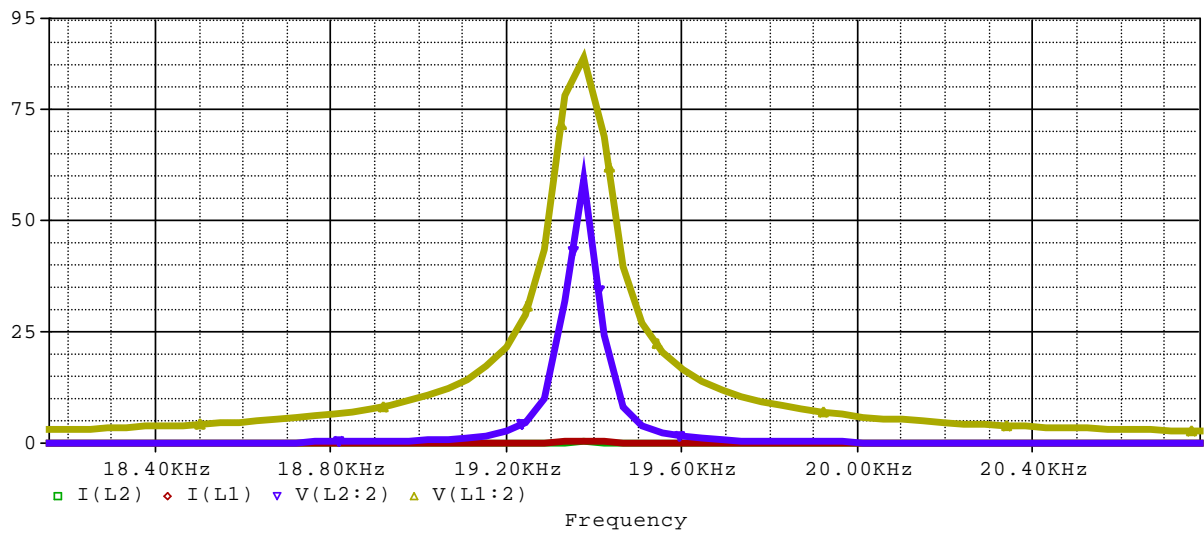


Gráfico 7 – Tensões e correntes versus frequência (análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,0021$).

Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 8, a seguir, destaca as correntes obtidas em simulação. É uma ampliação de um trecho já apresentado no Gráfico 7, porém agora em escala adaptada para uma melhor visualização desta faixa de operação.

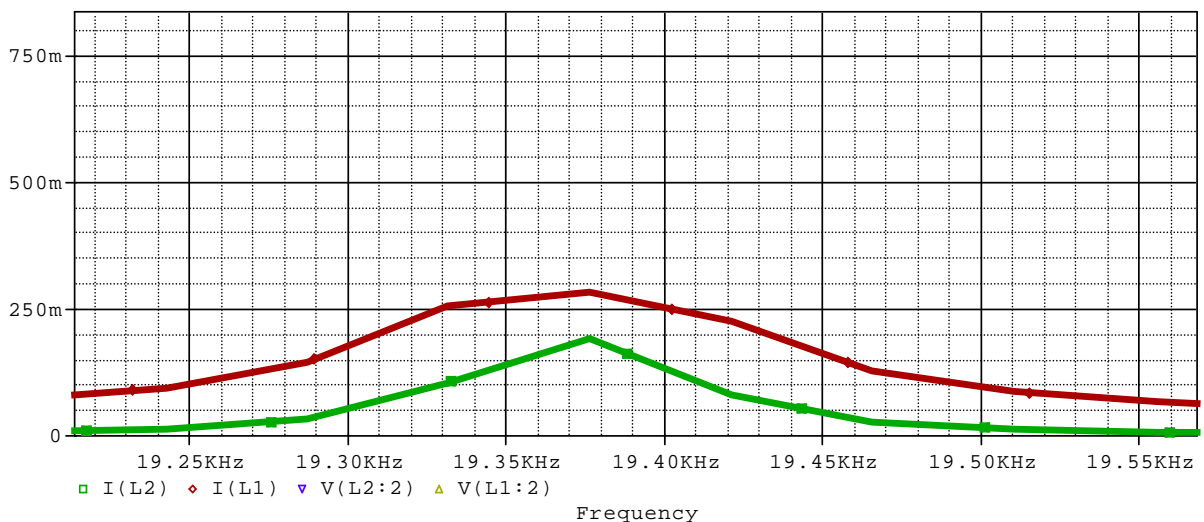


Gráfico 8 – Zoom das correntes versus frequência (detalhe da análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,0021$).

Fonte: Autoria própria.

3.4.4 Quarta simulação

A quarta simulação efetuada foi realizada com um acoplamento k igual a 0,0087. Analogamente, este valor também foi obtido utilizando-se a Equação 5, desta vez para uma indutância mútua (M) de projeto de 21,75 μH . De acordo com o tópico 2.2.1 (Coeficiente de acoplamento), este valor do coeficiente de acoplamento representa um acoplamento supercrítico, pois está acima de $k_{\text{critico}} = 0,003043$. O esquema utilizado no software de simulação PSpice Schematics pode ser visto na Figura 62, a seguir.

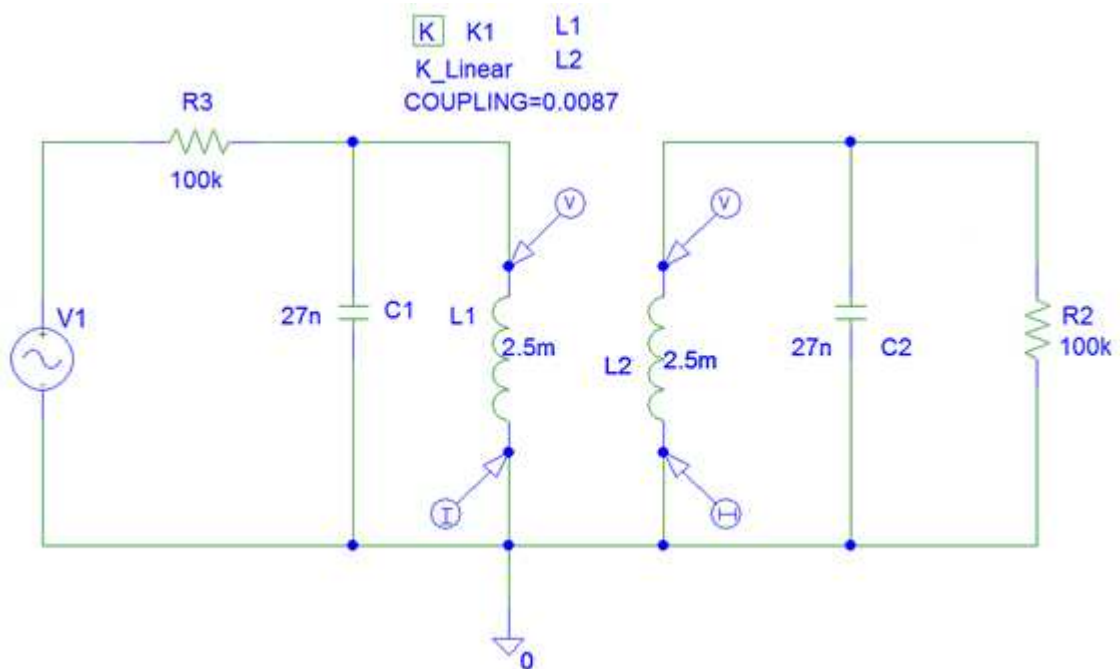


Figura 62 – Circuito analisado em simulação com coeficiente de acoplamento $k=0,0087$.

Fonte: Autoria própria.

Conforme o previsto no tópico 2.2.1 (Coeficiente de acoplamento), há dois picos de tensão simétricos (Gráfico 9), tanto para a bobina primária como para a bobina secundária. Os valores máximos de pico da tensão na bobina primária e na bobina secundária, foram de, aproximadamente, 70V e 60V, respectivamente. Há também mínimos de tensão, conforme o esperado, no valor de, aproximadamente, 11V e 39V, para a bobina primária e para a bobina secundária, respectivamente.

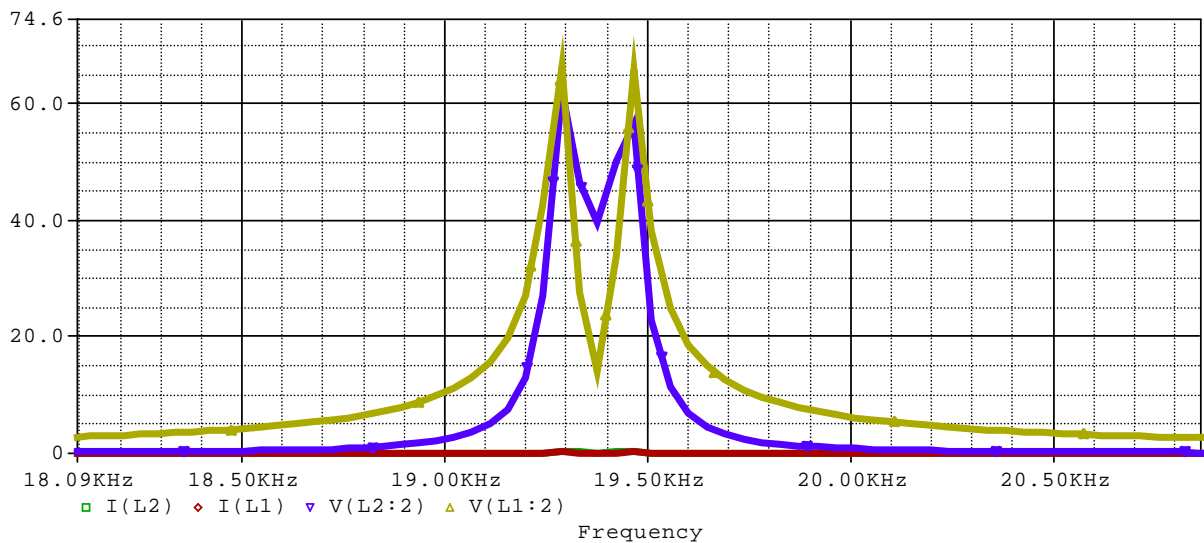


Gráfico 9 – Tensões e correntes versus frequência (análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,0021$).

Fonte: Autoria própria.

Para se calcular a frequência supercrítica, utilizaram-se as Equações 9, 11 e 10. Substituindo (9) e (11) em (10), tem-se que:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left(1 \mp \frac{1}{2} \sqrt{k^2 - \frac{1}{Q_0^2}} \right) \quad (19)$$

Sabe-se que a frequência é dada por:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (20)$$

Assim, substituindo (19) em (20):

$$f = \frac{\frac{1}{\sqrt{LC}} \left(1 \mp \frac{1}{2} \sqrt{k^2 - \frac{1}{Q_0^2}} \right)}{2\pi}$$

O valor de Q_0 já foi calculado em (17). Portanto, substituindo-se os demais valores da simulação, encontram-se os seguintes resultados:

$$f = \frac{\frac{1}{\sqrt{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 27 \cdot 10^{-9}}} \left(1 \mp \frac{1}{2} \sqrt{0,0087^2 - \frac{1}{328,634^2}} \right)}{2\pi} \Rightarrow \begin{cases} f_1 = 19,293 \text{ kHz} \\ f_2 = 19,451 \text{ kHz} \end{cases}$$

Foi possível perceber, conforme o Gráfico 9, que as frequências de ressonância ocorreram em aproximadamente 19,30kHz e em 19,46kHz, o que está de acordo com o esperado, pois o resultado encontrado nos cálculos foi $f_1 = 19,293$ kHz e $f_2 = 19,451$ kHz.

O Gráfico 10, a seguir, destaca as correntes obtidas em simulação. É uma ampliação de um trecho já apresentado no Gráfico 9, porém agora em escala adaptada para uma melhor visualização desta faixa de operação.

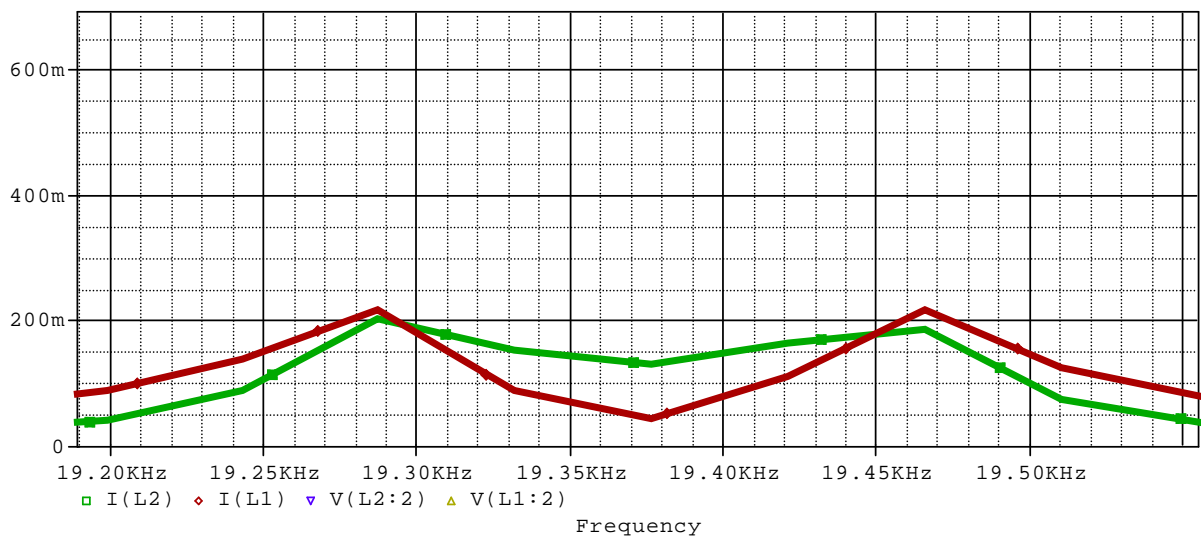


Gráfico 10 – Zoom das correntes versus frequência (detalhe da análise obtida em simulação com coeficiente de acoplamento $k = 0,0021$).

Fonte: Autoria própria.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a descoberta da energia elétrica, com a criação dos aparelhos eletroeletrônicos, os usuários destes dispositivos passaram a depender do uso da energia elétrica por meio de fios e cabos. Com o aprimoramento das pilhas e baterias foi possível tornar os aparelhos móveis, mesmo que por apenas um certo intervalo de tempo sem recarga.

Com a possibilidade da transmissão de energia elétrica sem fio, torna-se próxima a realidade de equipamentos alimentados eletricamente simplesmente habilitando-se a função de uma bobina acoplada no interior de cada equipamento, mantendo-os móveis mesmo enquanto são carregados. Para isso ser possível seria necessária a instalação de uma bobina transmissora como fonte (bobina primária) que proporcionasse energia suficiente para certos equipamentos com bobinas instaladas em seus circuitos (bobinas secundárias). Uma ilustração a respeito desse assunto pode ser vista no Anexo D desta monografia.

Com o presente estudo foi comprovada a existência da eletricidade sem fio e sua forma de transmissão por ressonância magnética. Percebeu-se que quanto menor a distância entre as bobinas primárias e secundárias e quanto mais paralelas se localizavam entre si, maior é a eficiência do sistema.

Porém, após a construção do protótipo e da análise realizada, foi verificado em pesquisas que se fosse utilizado um circuito transistorizado no secundário para amplificar o sinal de uma bateria, a transmissão de energia elétrica seria maior, sendo um tópico para trabalhos futuros.

Os valores obtidos em simulações estavam de acordo com o esperado e foram exatamente os mesmos, ou bem próximos, dos valores calculados, comprovando-se a veracidade das equações utilizadas.

Além disso, com o auxílio de simulações computacionais foi possível verificar as formas de onda da tensão e da corrente e pôde-se perceber que o fator mais importante para se estabelecer a tensão desejada no circuito é o fator de acoplamento entre as bobinas. Constatou-se que a melhor eficiência do sistema é alcançada quando se utiliza um acoplamento supercrítico, conforme o que está apresentado no Capítulo 2 deste trabalho.

Um detalhe importante a ser observado é que os estudos realizados e disponibilizados por cientistas até o momento não trazem muitos esclarecimentos

satisfatórios a respeito dos efeitos causados por campos magnéticos produzidos na transmissão de energia sem fio por tempo prolongado sobre os seres humanos. Esse é um fator que deve ser melhor estudado antes de se tentar aplicar essa tecnologia sem fio de maneira ampla, para toda a população. Alguns estudos a esse respeito estão apresentados em anexo (Anexo C).

De forma geral, a construção do transmissor de energia sem fio mostrou-se relativamente simples, sendo uma oportunidade de tecnologia futura que, se melhor estudada e esclarecidos seus efeitos sobre a saúde humana, pode vir a solucionar os problemas de fios e cabos em excesso nas instalações elétricas, melhorando-se também a estética do ambiente e tornando-o mais agradável e seguro.

REFERÊNCIAS

ABREU, R. L. de. **Projeto e desenvolvimento de dispositivo para transmissão de energia elétrica sem fios por modos ressonantes**. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2012.

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentals of electric circuits**. 4. ed. McGraw-Hill, 2009.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

GONDIM, F. P. **Transmissão de energia elétrica sem fio**. 2010. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

GROVER, F. W. **Inductance calculations: working formulas and tables**. New York: Dover Publications, 2009.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: Eletromagnetismo**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HAYT JUNIOR., W. H.; KEMMERLY, J. E.; DURBIN, S. M. **Análise de circuitos em engenharia**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

IARC. Non-ionizing radiation, part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) electric and magnetic fields. v. 80. **IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans**, Lyon, França, 2002.

LAMAS, M. L. F. **Circuitos de CA**. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/2013612-Circuitos-de-ca-prof-mario-luiz-f-lamas-curso-de-eletronica-v-v-m-sen-ot-i-i-m-sen-ot-p-2.html>>. Acesso em: 10 jul. 2015.

LI, Y. et al. Experimental system design of wireless power transfer based on witrlicity technology. **International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (CASE)**, Singapura, jul. 2011.

MARCATO, M. A. **Exposição humana a campos elétricos e magnéticos**. Disponível em: <http://ie.org.br/site/noticias/exibe/id_sessao/70/id_colunista/6/id_noticia/8077/Exposiçao-humana-a-campos-elétricos-e-magnéticos->. Acesso em: 12 ago. 2015.

MARCILIO, I.; HABERMANN, M.; GOUVEIA, N. Campos magnéticos de frequência extremamente baixa e efeitos na saúde: revisão da literatura. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, São Paulo, v. 12. n. 2, p. 105-123, jun. 2009.

MARTINS, M. **Conheça os carregadores de celular Wireless! Recarregam o celular sem fio!** Disponível em: <<http://porquenaopenseinisso.com.br/2014/04/28/conheca-os-carregadores-de-celular-wireless-recarregam-o-celular-sem-fio/>>. Acesso em: 16 set. 2015.

MIGUEL, N. BONIFÁCIO, C. **Transmissão de energia sem fios**. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Eletrônica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro. Aveiro, Portugal, 2009.

PAIOTTI, R. Wireless power transmission: transmissão de energia sem fio. **Saber eletrônico**. São Paulo, ano 46, n. 446, p. 14-17, mar/abr. 2010.

PAULA, R. N. F. de. **Nikola Tesla**. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/biografias/nikola-tesla/>>. Acesso em: 18 set. 2015.

SADIKU, M. N. O.; MUSA, S. M.; ALEXANDER, C. K. **Análise de circuitos elétricos com aplicações**. AMGH, 2014.

SUPREMO TRIBUNAL FEDERAL. 2013. **Riscos à saúde não podem ser considerados a partir de estudos isolados, diz físico italiano**. Disponível em: <<http://www.stf.jus.br/portal/cms/verNoticiaDetalhe.asp?idConteudo=232764>>. Acesso em 17 set. 2015.

UFMG. **Lei de indução de Faraday**. Disponível em: <http://www.fisica.ufmg.br/~labexp/roteirosPDF/Lei_inducao_de_Faraday.pdf>. Acesso em: 19 set. 2015.

VELOSO, L. O fim das tomadas: ao investir alto para viabilizar a transmissão de eletricidade sem o uso de fios, empresas de tecnologia prometem desplugar o mundo nos próximos anos. **Isto é**. São Paulo, n. 2179, ago. 2011.

VIEIRA, W. **Transmissor De Energia Sem Fio**. 2013. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=cQB8xkVPERo>>. Acesso em: 22 set. 2015.

ZHAO, J. et al. A contrastive studies between magnetic coupling resonance and electromagnetic induction in wireless energy transmission. **Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF)**, Dalian, Liaoning, jun. 2012.

ANEXO A – INDUTÂNCIA MÚTUA

A indutância mútua é a indutância que surge entre dois sistemas quando os mesmos apresentam uma certa proximidade. Ela está ligada diretamente ao fator de acoplamento, que descreve a intensidade pela qual os dois sistemas estão acoplados (ABREU, 2012).

A indutância mútua é representada analiticamente pelo método geral proposto por Grover (2009). A Figura 63 representa o caso geral de bobinas de uma única espira circular.

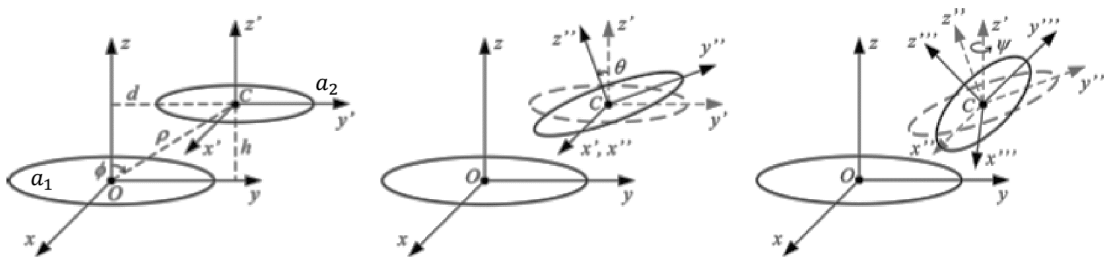


Figura 63 – Caso geral para cálculo da indutância mútua.

Fonte: Grover (2009).

Na Figura 63, são exibidas as variáveis mais relevantes para os cálculos, essas variáveis estão relacionadas a seguir:

- h = distância de separação entre as antenas;
- a_1 = raio da antena 1 [m];
- a_2 = raio da antena 2 [m];
- d = distância de separação na direção y [m];
- θ = inclinação da antena 2 com relação a antena 1 sobre o eixo z [°];
- ϕ = inclinação da antena 1 com relação a antena 2, em relação ao centro C da antena 2;
- ρ = distância de separação entre os centros da antena 1 até a antena 2;
- ψ = rotação da antena 2 com relação ao eixo z .

A equação que define a indutância mútua para o caso geral é dada por:

$$M_{12} = \frac{\mu_0 a_2}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{[p_1 \cos \varphi + p_2 \operatorname{sen} \varphi + p_3] \psi(k)}{k \sqrt{V_0^3}} d\varphi \quad (21)$$

onde:

$$p_1 = \pm \frac{\gamma c'}{l}$$

$$p_2 = \mp \frac{\beta l^2 + \gamma a' b'}{lL}$$

$$p_3 = \frac{\alpha c'}{L}$$

$$p_4 = \mp \frac{\beta a' b' + \gamma l^2 + \delta b' c'}{lL}$$

$$p_5 = \mp \frac{\beta c' + \delta a'}{l}$$

$$\alpha = \frac{a_2}{a_1}$$

$$\beta = \frac{x_c}{a_1}$$

$$\gamma = \frac{d}{a_1}$$

$$\delta = \frac{h}{a_1}$$

$$l = \sqrt{a'^2 + c'^2}$$

$$l = \sqrt{a'^2 + b'^2 + c'^2}$$

$$V_0^2 = \alpha^2 \left[\left(1 - \frac{b'^2 c'^2}{l^2 L^2} \right) \cos^2 \varphi + \frac{c'^2}{l^2} \operatorname{sen}^2 \varphi + \frac{a' b' c'}{l^2 L} \operatorname{sen} 2\varphi \right] + \beta^2 + \gamma^2$$

$$\mp 2\alpha \frac{\beta a' b' + \gamma l^2}{lL} \cos \varphi \mp \frac{2\alpha \beta c'}{l} \operatorname{sen} \varphi$$

sendo:

- a' , b' , c' os parâmetros que definem a normal ao plano λ , contendo a segunda bobina;
- x_c a coordenada x do centro da bobina 2.

Ainda para a Equação 21, tem-se que:

$$k = \frac{4V_0}{A_0 + 2V_0}$$

e:

$$\psi(k) = \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k)$$

com:

$$A_0 = 1 + a'^2 + \beta'^2 + \gamma^2 + \delta^2 + 2\alpha(p_4 \cos \varphi + p_5 \sin \varphi)$$

onde $K(k)$ e $E(k)$, de acordo com Abreu (2012), representam as integrais elípticas completas de primeira e segunda ordem, e são definidas conforme as Equações 22 e 23, a seguir:

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\beta}{\sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \beta}} \quad (22)$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \beta} d\beta \quad (23)$$

ANEXO B – CAMPO MAGNÉTICO PRODUZIDO NA ATIVIDADE CEREBRAL

Os cientistas têm grande interesse em compreender como o cérebro funciona. Halliday, Resnick e Walker (2009) mencionam que um dos novos métodos para estudar o funcionamento do cérebro é a magnetencefalografia (MEG), que consiste em monitorar os campos magnéticos produzidos pelo cérebro enquanto o paciente realiza uma tarefa, como ler uma palavra, por exemplo. A tarefa ativa uma região do cérebro, como a que processa a leitura, fazendo com que pulsos elétricos sejam enviados ao longo de circuitos nervosos. Como acontece com qualquer corrente, esses pulsos produzem campos magnéticos.

Os campos magnéticos detectados pela MEG são, provavelmente, produzidos por pulsos nas paredes das fissuras (sulcos) existentes na superfície do cérebro. Ou seja, ao ser efetuada uma tarefa, se tem um pulso na parede de uma fissura na superfície do cérebro produzindo um campo magnético no ponto P situado a uma distância r , conforme a ilustração da Figura 64.

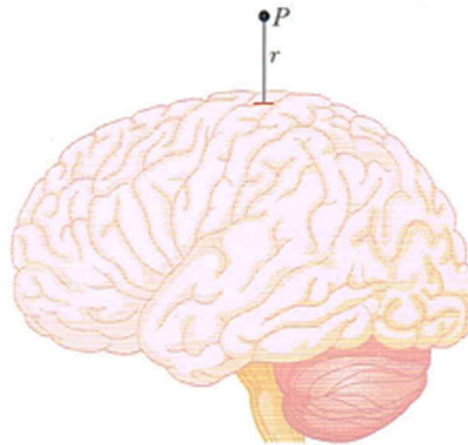


Figura 64 – Ponto P situado a uma distância r da superfície do cérebro.

Fonte: Halliday; Resnick; Walker (2009).

Para estimar a intensidade desse campo em um ponto P situado a uma distância $r = 2$ cm do pulso, por exemplo, utiliza-se a Equação 14, apresentada anteriormente. Para isso, pode-se supor que a trajetória do pulso seja tangente à superfície do cérebro, caso em que o ângulo θ da Equação 14 é 90° . Em um pulso típico a corrente é $i = 10 \mu\text{A}$, e a distância percorrida é da ordem de 1 mm. Ao se

tomar essa distância como sendo o elemento de comprimento ds na Equação 6, tem-se que:

$$B = \frac{\left(4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \frac{\text{m}}{\text{A}}\right) (10 \times 10^{-6} \text{ A})(1 \times 10^{-3} \text{ m})}{4\pi (2 \times 10^{-2} \text{ m})^2} \text{sen } 90^\circ = 2,5 \times 10^{-12} \text{ T} \approx 3 \text{ pT}$$

Trata-se de um campo extremamente pequeno, mais de um milhão de vezes mais fraco que o campo magnético terrestre. Assim, para detectar os campos magnéticos produzidos pelo cérebro é utilizado um instrumento muito sensível, conhecido como SQUID (*superconducting quantum interference device*), capaz de medir campos menores que 1 pT, eliminando outras fontes de campos magnéticos variáveis nas vizinhanças.

ANEXO C – INFLUÊNCIA DOS CAMPOS MAGNÉTICO E ELÉTRICO SOBRE A SAÚDE HUMANA

O número crescente e a multiplicidade de casos de câncer e doenças degenerativas que afetam a saúde das populações tem provocado uma corrida dos países, centros de pesquisa, agências e organizações na busca das possíveis origens e soluções desses graves problemas. A alta incidência dessas doenças tem sido atribuída a uma diversidade de causas, entre as quais se situam fatores genéticos, hábitos de vida (fumo, stress, sedentarismo) alimentação, poluição ambiental, agentes químicos, radiações solares, nucleares, geofísicas e eletromagnéticas, entre outras (MARCATO, 2013).

Na questão das emissões eletromagnéticas, a legislação brasileira (Lei 11.934 de 5/05/2009) estabeleceu que fossem adotados, especialmente nos setores elétrico e de telefonia, os limites recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) com base nas *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields* (Diretrizes para limitação da exposição a campos elétricos e magnéticos variáveis ao longo do tempo) da ICNIRP – *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (Comissão Internacional de Proteção Contra as Radiações Não Ionizantes).

A ICNIRP é uma entidade sem fins lucrativos, com sede na Alemanha, formada por um corpo de especialistas independentes dedicados à pesquisa de soluções das importantes questões relacionadas com os possíveis riscos para a saúde humana derivados da exposição às Radiações Não Ionizantes (RNI) que incluem todas as radiações e campos do espectro eletromagnético que normalmente não possuem energia suficiente para ionizar a matéria. Segundo Marcato (2013), as RNIs se caracterizam por apresentarem energia por fóton inferior a 12 eV, o que equivale a comprimentos de onda superiores a 100 nm e frequências inferiores a 3×10^{15} Hz. Entre elas estão as emissões produzidas pela corrente elétrica em frequência industrial (50Hz/60HZ) e as Radiofrequências (RF) que se referem à energia eletromagnética na gama de 3 kHz a 300 GHz, incluídos também os telefones celulares que operam nas faixas de 3G (850 MHz-2100 MHz) e 4G (2500 MHz-2690 MHz), equipamentos de diagnóstico e procedimentos médicos e diversos tipos de eletrodomésticos como os fornos de micro-ondas que trabalham na faixa de 2,45 GHz.

De acordo com o físico italiano Paolo Vecchia, professor na Universidade de Roma e ex-presidente da ICNIRP, nos últimos anos, grupos de “experts” têm realizado estudos com essa abrangência por iniciativa de organizações internacionais como a ICNIRP e a OMS, governos de diversos países e institutos de pesquisa. Segundo ele, há pelo menos 10 estudos extremamente minuciosos com resultados bastante consistentes em sua abordagem, análise e conclusões (STF, 2013).

Os relatórios desses grupos, informa o professor, apontam que, em curto prazo, apenas um alto nível de exposição a campos magnéticos causa problemas à saúde humana. Acrescentou que, para o longo prazo, as conclusões, ainda que hipotéticas, são contraditórias, pois sugerem a associação de casos específicos de câncer à proximidade de campos magnéticos, mas não apontam um mecanismo que os provoque.

Segundo ele, há dois diferentes cenários em termos de pesquisas e também de políticas de saúde que devem ser colocadas em prática para lidar com esses efeitos. Ele considera que:

- os efeitos agudos podem ser reduzidos pela imposição de limites de exposição que possibilitem total prevenção.
- para lidar com os efeitos da exposição por longo prazo são necessárias medidas de precaução que, acredita ele, são essencialmente políticas, pois, se há riscos para a saúde, eles existem em qualquer nível de exposição e, fixar limites significa que, de forma implícita ou explícita, se está aceitando certo nível de risco. E isso, segundo ele, é uma decisão política.

Paolo Vecchia destacou que, embora a Agência Internacional para Pesquisa sobre Câncer (IARC – *International Agency for Research on Cancer*) tenha publicado uma monografia, em 2002, classificando os campos magnéticos de extrema baixa frequência como “possivelmente carcinogênicos” para humanos, os resultados não são referendados pela OMS (IARC, 2002).

Vecchia considera que os formuladores de políticas públicas deveriam estabelecer diretrizes para a exposição a campos magnéticos de extrema baixa frequência tanto do público em geral quanto dos trabalhadores e que a melhor fonte de orientação são as diretrizes internacionais. Ele ressalta que as diretrizes da OMS

dizem que o princípio da precaução deve ser aplicado, desde que os benefícios sociais, econômicos e de saúde gerados pela energia elétrica não sejam comprometidos. Ainda segundo ele, a implementação de procedimentos de precaução de custo muito baixo para reduzir a exposição é razoável e justificada (STF, 2013).

A ICNIRP salienta que a proteção das pessoas expostas a campos elétricos e magnéticos pode ser garantida se forem cumpridos todos os limites e demais aspectos de suas diretrizes básicas citadas anteriormente, mas ela não tem poder mandatório para estabelecer restrições obrigatórias cabendo aos governos promulgar leis e normas que regulamentem a sua correta aplicação.

ANEXO C.1 – RESTRIÇÕES PARA CAMPOS MAGNÉTICO E ELÉTRICO PRODUZIDOS PELA ENERGIA ELÉTRICA

Como as restrições e os efeitos são distintos conforme a frequência de operação e área de utilização das fontes emissoras coube à ANEEL o estabelecimento no Brasil das Normas referentes aos limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, na frequência industrial de 60 Hz (MARCATO, 2013).

Em suas especificações para o projeto de novas linhas de transmissão em alta tensão a ANEEL estabelece os seguintes parâmetros em relação a campos magnéticos e a campos elétricos: Devem ser atendidas as exigências da Resolução Normativa ANEEL nº398, de 23/03/2010.

Essa Resolução Normativa nº 398 de 23/03/2010 fixou para o Público em Geral os Níveis de Referência do Campo Elétrico no limite da faixa de segurança das instalações elétricas em 4,17 kV/m (4170 V/m) e do Campo Magnético em 83,3 μ T (micro Teslas) ou 833 mG (mili Gauss) em conformidade com os limites estabelecidos pela ICNIRP nas *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields* (1 Hz - 100 kHz).

De acordo com Marcato (2013), o tema das radiações eletromagnéticas é tratado também nas normas do IEEE respectivamente: IEEE Std.C95.6 - 2002 para frequências abaixo de 3 kHz e IEEE Std.C95.1 – 2005 para frequências entre 3 kHz e 300 GHz.

ANEXO C.2 – CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS CAMPOS MAGNÉTICOS

A revisão da literatura feita por Marcilio, Habermann e Gouveia (2009), aponta uma considerável produção bibliográfica sobre o tema, mas observa uma escassez de estudos no Brasil e demais países da América do Sul.

Apesar do grande número de publicações, os resultados acerca dos riscos à saúde associados à exposição a campos magnéticos têm sido controversos. Os principais desfechos estudados foram leucemia, tumor de sistema nervoso central, câncer de mama e doenças neurodegenerativas.

Desses, leucemias em crianças aparecem mais consistentemente associados à exposição a campos magnéticos. Leucemia em adultos e tumor de sistema nervoso central também parecem estar associados à exposição aos campos, mas existe um menor número de estudos fazendo essa avaliação. O câncer de mama, ao contrário, não parece ter o risco aumentado em decorrência de exposição a campos magnéticos.

De tudo o que foi encontrado a respeito, pode-se concluir que a quantificação da exposição e a falta de um mecanismo biológico que explique a interação entre os campos magnéticos de frequência extremamente baixa e seus efeitos na saúde constituem o maior empecilho na investigação dos riscos à saúde associados a campos magnéticos.

ANEXO D – ILUSTRAÇÃO DE UM AMBIENTE SEM FIOS

Veja a seguir uma figura ilustrando a possibilidade do uso da transmissão de energia elétrica sem fios e algumas aplicações para o cotidiano.



Figura 65 – Ambiente futurístico, sem a necessidade de fios conectados aos equipamentos.

Fonte: Veloso (2011).