

**FACULDADE DOCTUM  
MAXWELL ROGER FERREIRA FAVA  
RAPHAEL ALVES DOS REIS**

**ESTUDO E ANÁLISE DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO**

Juiz de Fora  
2019

**MAXWELL ROGGER FERREIRA FAVA  
RAPHAEL ALVES DOS REIS**

**ESTUDO E ANÁLISE DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO**

Monografia de Conclusão de Curso, apresentada ao curso de Engenharia Elétrica, Faculdade Doctum de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador : Prof. Dr. Alan Espinosa Maicá

Juiz de Fora  
2019

**Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca Faculdade Doctum/JF**

dos Reis, Raphael Alves  
Fava, Maxwell Rogger Ferreira

Estudo e Análise da Transmissão de Energia sem Fio / Maxwell Rogger Ferreira Fava, Raphael Alves dos Reis - 2019.

Nº folhas. 49.

Monografia (Curso de Engenharia Elétrica) –  
Faculdade Doctum Juiz de Fora.

1. Energia sem Fio. 2. Eletromagnetismo  
I. Estudo e Análise da Transmissão de Energia sem Fio.  
II Faculdade Doctum Juiz de Fora

**MAXWELL ROGGER FERREIRA FAVA  
RAPHAEL ALVES DOS REIS**

**ESTUDO E ANÁLISE DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO**

Monografia de Conclusão de Curso,  
submetida à Faculdade Doctum de Juiz de  
Fora, como requisito parcial à obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Elétrica  
e aprovada pela seguinte banca  
examinadora.

---

Prof. Dr. Alan Espinosa Maicá  
Orientador e Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

---

Prof. Me. José Carlos Miranda Grizendi  
Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

---

Prof. Me. Luis Gustavo Schröder e Braga  
Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

Examinada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_.

TERMO DE APROVAÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado Estudo e Análise da  
Transmissão de Energia sem Fio

elaborado pelos alunos Maxwell Roggeri Ferrreira Faria e  
Raphael Alves dos Reis

foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceita pelo curso de  
Engenharia Elétrica, como requisito parcial da  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Juiz de Fora, 11 de Dezembro de 2019.

Alan E. Maia

Professor Orientador

[Assinatura]  
Professor Avaliador 1

[Assinatura]  
Professor Avaliador 2

### **Epígrafe**

“Em todo o espaço há energia... é (só) uma questão de tempo até que os homens tenham êxito em associar seus mecanismos ao aproveitamento desta energia”.

***Nikola Tesla***

## **AGRADECIMENTOS**

Eu, Maxwell Rogger Ferreira Fava, agradeço a Deus pela saúde e pelo prazer de poder estar alcançando mais essa etapa acadêmica em minha vida. Agradeço ao meu pai Sabino Luzia da Cruz Fava, minha mãe Maria Luzia Ferreira Fava e minha irmã Lays Ferreira Fava pelo incentivo e pelo carinho de sempre, sem vocês nada disso seria possível. Agradeço aos meus familiares por ter acreditado em meu potencial e ter me dado forças para chegar até ao final deste curso, sem essa força nada disso seria concretizado. Agradeço a todos os amigos de turma pelos momentos de alegria e tristeza que passamos juntos, graças à união, a força de vontade e companheirismo. Agradeço o professor e orientador Alan Espinosa Maicá por ter me orientado neste trabalho de conclusão de curso, sem essa condução este trabalho não seria concretizado. Agradeço ao meu grande amigo Raphael Alves dos Reis que com grande dedicação e esforços abraçou esse tema junto a mim. Agradeço a todos os professores pelos ensinamentos, que passaram suas experiências e conhecimentos para a minha absorção e aprendizado na engenharia. Agradeço a todos envolvidos diretamente e indiretamente que de certa forma contribuíram na minha graduação em engenharia elétrica.

Eu, Raphael Alves dos Reis, agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido este imenso prazer de poder estar alcançando mais um objetivo de vida pessoal, concluindo dessa forma mais uma etapa de estudos alcançados, por ter me dado força nos momentos mais difíceis, também sou eternamente agradecido a minha família, por ter me incentivado e me ter proporcionado essa oportunidade, em especial a minha mãe Marlene Alves dos Reis (em memória), que foi minha maior incentivadora e hoje junto a Deus está a me guiar nesta trajetória de estudos ao longo da graduação, podendo assim realizar nossos sonhos e objetivos juntos traçados. Aos meus tios que foram como pai para mim, a minha namorada e grande incentivadora Rafaela Santos Bonioli, e não poderia deixar de agradecer ao meu parceiro de pesquisas, além de grande amigo que a graduação me proporcionou Maxwell Rogger Ferreira Fava, que abraçou esse tema junto a mim. E a todos amigos, familiares e professores que contribuíram de alguma forma para que hoje pudesse realizar essa meta de vida.

## RESUMO

DOS REIS, RAPHAEL ALVES; FAVA, MAXWELL ROGGER FERREIRA. ESTUDO E ANÁLISE DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO. Número de folhas (51.). Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Faculdade Doctum, Juiz de Fora, 2019.

Com base nos atuais avanços tecnológicos, com os quais estamos em constante contato, é natural questionar, por que não buscar novas alternativas para a transmissão de energia. Desta forma, pretende-se estudar e analisar a transmissão de energia sem fio tema já abordado por Nikola Tesla no início século XX, onde o mesmo pregava a energia livre de fios utilizando a indução magnética. Entretanto, para a época, a medição e controle da transmissão de energia para o período era limitada, impossibilitando sua realização. Visando também a praticidade, agilidade e conforto do usuário, pode-se mencionar alguns avanços tecnológicos possíveis oriundos da utilização da transmissão de energia sem fio, como por exemplo, uma maior facilidade para carregamentos de celulares, carros movidos à eletricidade, dentre outros. O desenvolvimento do protótipo neste trabalho se deu através da fabricação de diversas bobinas primárias e secundárias no qual se altera o seu diâmetro e número de espiras a fim de se alterar o fluxo magnético e consequentemente a indução magnética, a fim de acharmos um modelo de bobina que se enquadra melhor para o carregamento de um dispositivo móvel futuramente. Foi verificado no presente estudo que a transmissão de energia sem fio é possível, entretanto, há diversas variáveis que interferem de forma direta na transmissão deste tipo de energia, como a variação no alinhamento das bobinas, um pequeno aumento na separação entre as bobinas, e o fato de que um menor número de espiras corresponde a um menor o campo induzido.

**Palavras-chave:** Transmissão de Energia sem Fio. WPT (Wireless Power Transfer). Indução Eletromagnética. Bobinas. Wireless.

## **ABSTRACT**

Based on current technological advances, which we are in constant contact, it is natural to ask why not looking for new alternatives for power transmission. Thus, it is intended to study and analyze the wireless power transmission theme already addressed by Nikola Tesla in the early twentieth century, where he preached the free energy of wires using magnetic induction. However, for the time, the measurement and control of the energy transmission for the period was limited, making it impossible to perform. Aiming at the practicality, agility and comfort of the user, it is possible to mention some possible technological advances arising from the use of wireless power transmission, such as the ease of charging mobile phones, cars powered by electricity, among others. The prototype development in this work took place through the manufacture of several primary and secondary coils in which its diameter and number of turns are altered in order to change the magnetic flux and consequently the magnetic induction, in order to find a coil model. that fits better for charging a mobile device in the future. It was found in the present study that wireless power transmission is possible, however, there are several variables that directly affect the transmission of this type of energy, such as variation in coil alignment, a small increase in coil separation, and the fact that a smaller number of turns corresponds to a smaller the induced field.

**Keywords:** Wireless Transmission. WPT (Wireless Power Transfer). Electromagnetic Induction. Coils. Wireless.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esboço do protótipo .....	16
Figura 2 – Lei de Lenz.....	19
Figura 3 – Bobinas acopladas eletromagneticamente através do fluxo magnético .....	19
Figura 4 – Circuito para medição do fator de acoplamento .....	21
Figura 5 – Modelos de bobinas.....	27
Figura 6 – Fluxograma bobinas primárias e secundárias .....	29
Figura 7 – Bobinas emissoras e receptoras, sobrepostas e não sobrepostas, com diâmetro maior e menor .....	30
Figura 8 – Fluxograma bobina emissora fixa e as variações das bobinas receptoras ....	32
Figura 9 – Demonstração do protótipo .....	33
Figura 10 – Bobina emissora sobreposta $D_2N_2$ e receptora sobreposta $D_1N_1$ .....	34
Figura 11 – Bobina emissora sobreposta $D_2N_2$ e receptora sobreposta $D_1N_2$ .....	34
Figura 12 – Bobina emissora sobreposta $D_2N_2$ e receptora sobreposta $D_2N_1$ .....	35
Figura 13 – Bobina emissora sobreposta $D_2N_2$ e receptora sobreposta $D_2N_2$ .....	35
Figura 14 – Bobina emissora sobreposta $D_2N_2$ e receptora não sobreposta $D_1N_1$ .....	36
Figura 15 – Bobina emissora sobreposta $D_2N_2$ e receptora não sobreposta $D_1N_2$ .....	36
Figura 16 – Bobina emissora sobreposta $D_2N_2$ e receptora não sobreposta $D_2N_1$ .....	37
Figura 17 – Bobina emissora sobreposta $D_2N_2$ e receptora não sobreposta $D_2N_2$ .....	37
Figura 18 – Fluxograma bobina receptora fixa e as variações das bobinas emissoras ..	39
Figura 19 – Demonstração do protótipo com ajuste na corrente.....	40
Figura 20 – Bobina receptora sobreposta $D_2N_2$ e emissora sobreposta $D_1N_1$ .....	41
Figura 21 – Bobina receptora sobreposta $D_2N_2$ e emissora sobreposta $D_1N_2$ .....	41
Figura 22 – Bobina receptora sobreposta $D_2N_2$ e emissora sobreposta $D_2N_1$ .....	42
Figura 23 – Bobina receptora sobreposta $D_2N_2$ e emissora sobreposta $D_2N_2$ .....	42
Figura 24 – Bobina receptora sobreposta $D_2N_2$ e emissora não sobreposta $D_1N_1$ .....	43
Figura 25 – Bobina receptora sobreposta $D_2N_2$ e emissora não sobreposta $D_1N_2$ .....	43
Figura 26 – Bobina receptora sobreposta $D_2N_2$ e emissora não sobreposta $D_2N_1$ .....	44
Figura 27 – Bobina receptora sobreposta $D_2N_2$ e emissora não sobreposta $D_2N_2$ .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das Bobinas emissoras e receptoras.....	30
Tabela 2 – Resultados obtidos para bobina emissora sobreposta $D_2N_2$ fixa e receptoras sobrepostas e não sobrepostas.....	38
Tabela 3 – Resultados obtidos para bobina receptora sobreposta $D_2N_2$ fixa e emissoras sobrepostas e não sobrepostas .....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampere
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente continua
Cm	Centímetros
D	Diâmetro
$E_A$	Energia Armazenada
$E_D$	Energia Dissipada
$F_{em}$	Força Eletromotriz
H	Henry
KHz	Kilohertz
$K\Omega$	Kiloohms
LED	Diodo Emissor de Luz
M	Indutância mútua
mA	Miliamperes
Mhz	Megahertz
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
R	Resistência
RLC	Resistivo, Indutivo e Capacitivo
V	Volts
$V_{BC}$	Tensão Base – Coletor
$V_{BE}$	Tensão Base – Emissor
$V_p$	Tensão de Pico
$V_{pp}$	Tensão pico a pico
W	Whats
Wb	Webers
WPT	Wireless Power Transfer

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{B}_1$	Campo Magnético
$C$	Capacitância do capacitor
$C$	Capacitor
$\alpha$	Constante adimensional = $\omega C_2 R_L$ ;
$I$	Corrente
$H$	Eficiência
$k$	Fator de Acoplamento
$Q$	Fator de Qualidade
$\Psi$	Fluxo magnético
$f$	Frequência
$\omega$	Frequência angular
$Z_M$	Impedância Mútua
$L$	Indutor
$N$	Número de Espiras

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEORICO</b>	<b>18</b>
3.1	Teoria do acoplamento eletromagnético	18
3.1.1	Indutância mútua e acoplamento indutivo	19
3.1.2	Desempenho de um link indutivo	25
3.2	Bobinas	26
3.3	Transistor	28
3.3.1	Transistores NPN	28
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	<b>29</b>
4.1	Construções de bobinas	29
4.2	Parâmetros para os testes	31
4.3	Bobina emissora fixa e variando bobinas receptoras	32
4.3.1	Testes com bobina emissora $D_2N_2$ e receptoras sobrepostas	33
4.3.2	Testes com bobina emissora $D_2N_2$ e receptoras não sobrepostas	35
4.3.3	Comparativo entre bobinas receptoras sobrepostas e não sobrepostas	37
4.4	Bobina receptora fixa e variando bobinas emissoras	39
4.4.1	Testes com bobina receptora $D_2N_2$ e emissoras sobrepostas	40
4.4.2	Testes com bobina receptora $D_2N_2$ e emissoras não sobrepostas	42
4.4.3	Comparativo entre bobinas emissoras sobrepostas e não sobrepostas	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os esforços dedicados ao desenvolvimento de sistemas para transmissão eficiente de energia sem fio, também chamado de WPT (*Wireless Power Transfer*) vêm de longa data (Zhu et al, 2015). Um dos pioneiros nesta busca foi Nikola Tesla entre o final do século XIX e o início do século XX que buscava a transmissão de energia por indução magnética, sugerida logo após Ampère e Faraday publicarem suas leis que se tornaram pilares do tema (TESLA, 1914).

O primeiro trabalho desenvolvido por Tesla referente à WPT, registrado em seu nome e patenteado como “Bobina de Tesla”, consistia em uma bobina ressonante de campo magnético que eleva a tensão e frequência em altos valores. O desenvolvimento de Tesla permitia que pessoas transmitissem energia através de seus corpos para ascenderem lâmpadas sem precisarem utilizar fios. Porém, o desenvolvimento foi limitado devido às tecnologias da época não serem suficientes para a aplicação do mesmo (TESLA, 1914).

Após décadas o assunto voltou a tona, onde a partir dos anos 90 surgiram escovas de dentes elétricas e os carregadores dos carros elétricos EV-1 da General Motors. (VELOSO, 2012).

Já no começo do século XXI, mais precisamente no começo dos anos 2000, na Europa teve-se início a utilização de ônibus elétricos com sistema de carregamento via indução magnética (VELOSO, 2012)

Em 2004 Qualcomm fundou a empresa WiPower, que continuou a implementação desta tecnologia, vindo em 2015 se tornar a primeira empresa a ativar o carregamento sem fio para dispositivos móveis com carcaça metálica. (SAGIORATO, 2017).

Em 2006, um grupo de pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) desenvolveram um sistema contendo duas bobinas de cobre (independentes de conexões uma da outra) sendo uma emissora que foi conectada a uma fonte de potência de sinal senoidal com frequência da ordem de 10 Mhz e uma receptora. Os pesquisadores conseguiram acender uma lâmpada de 60 W a uma distancia de 2 (dois) metros (KARALIS, 2008).

A Samsung, empresa sul-coreana, lançou um carregado sem fio em 2015 chamado “Samsung Wireless Charging”. Que consiste em um disco pequeno, com

cerca de 10cm de diâmetro e 2cm de altura, a alimentação é feita em 5V e a corrente de saída é de 1000mA (SAGIORATO, 2017)

Pode-se ressaltar que o sucesso dessas experiências e a evolução dos estudos a respeito, representam um avanço significativo no que se refere ao nível de desenvolvimento tecnológico atual, podendo ser aplicados como por exemplo, em sistemas aeroespaciais, alimentação de sensores dentro de indústrias, carregamento de mini submarinos de pesquisas, em um futuro próximo no qual a transferência de eletricidade seria sem fio, sem a necessidade de conectá-los a uma tomada ou a qualquer outro meio físico.

Desta forma, buscando maior praticidade visto o crescente aumento de usuários de dispositivos móveis como *notebooks*, *smartphones*, *tabletes*, substituindo aparelhos fixos como computadores de mesa e telefones fixos. A crescente expansão da mobilidade gerou, do lado dos usuários, o desejo de receber energia sem a necessidade de conexão por fio, da mesma forma que se habituaram a receber conteúdo de mídias digitais, sinal de voz e dados via *wireless* ou dados móveis da telefonia. Tal desejo traz consigo um desafio tecnológico aos fabricantes em superar a barreira da mobilidade plena, sem precisar do contato com nenhuma superfície, grande proximidade com o emissor, dentre outros fatores que impedem a mobilidade absoluta.

Através de todos os projetos desenvolvidos de WPT. Propõe-se o estudo e compreensão do sistema de transmissão de energia sem Fio, utilizando de estudos de casos e cálculos matemáticos, em busca de uma aplicação prática em um sistema elétrico de baixa potência.

A relevância deste trabalho consiste em desenvolver um protótipo buscando maior praticidade, agilidade e conforto para a sociedade, na intenção de facilitar o carregamento de celulares evitando a necessidade do aparelho estar diretamente conectado a uma tomada e evitando que o usuário tenha gastos em excesso com a compra de cabos originais, que são caros, ou cabos paralelos em que sua grande maioria são de baixa qualidade.

## **1.1 Justificativa**

Além de não possuir as limitações causadas pelos fios condutores, à transmissão de energia sem fio é uma tecnologia sustentável por reduzir a demanda

de cabos de força e conseqüentemente de sua matéria prima (plástico, conectores, cobre), diminuir os riscos de acidentes domésticos causados pelo uso de energia elétrica. Também é uma tecnologia de fácil uso para o consumidor e ainda mais de rum aparelho pode compartilhar uma única fonte de energia via *wireless*.

Com a modernização constante, pesquisas a respeito do carregamento de aparelhos em geral através da transmissão de energia wireless vêm sendo estimuladas ao longo dos anos. A população já vem procurando aparelhos cada vez mais modernos e tecnológicos e, com isso, a tendência é que a tecnológica wireless se torne cada vez mais presente em nosso cotidiano.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo desse trabalho é desenvolver um protótipo utilizando a transferência de energia sem fio capaz de se acender um LED analisando diversos tipos de bobinas emissoras e receptoras.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para estudar e analisar os diversos elementos deste trabalho de conclusão de curso e seus principais objetivos, os seguintes tópicos serão analisados:

- Estudar os trabalhos encontrados na literatura acerca do tema definido;
- Desenvolvimento de um protótipo capaz de acender um LED via WPT;
- Teste com diversos tipos de bobinas primárias (emissoras) e secundárias (receptoras) a fim de analisar a eficiência das mesmas na transmissão de energia sem fio.

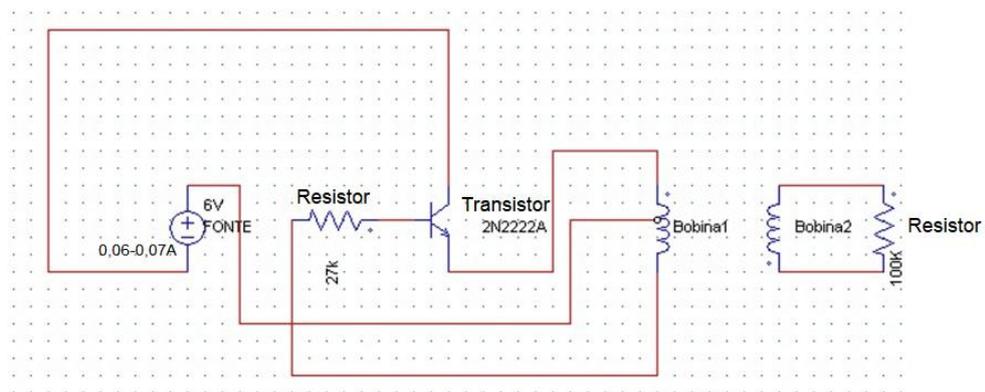
## 2 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho de conclusão de curso desenvolveu-se a partir da pesquisa sobre a WPT aplicada a baixa tensão. O tema surgiu através da viabilidade, conforto e versatilidade que a energia sem fio nos proporcionaria nos dias atuais.

Inicialmente, uma pesquisa bibliográfica (utilizando a ferramenta Google Acadêmico), foi realizada para estudar projetos que utilizassem a transmissão de energia sem fio, verificando suas aplicabilidades, estrutura e funcionalidades a fim de desenvolver um protótipo.

A Figura 1 ilustra o esboço do protótipo realizado no software PSIN.

Figura 1 – Esboço do protótipo



Fonte: Autores (2019)

O protótipo consiste em montar um sistema WPT capaz de acender um LED baseado em estudos colhidos nas pesquisas. Ele é constituído por duas bobinas de cobre, no qual a Bobina 1 é a primária – emissora – que esta ligada a uma fonte de corrente contínua, a um transistor e a um resistor. Esse transistor se faz necessário para o chaveamento do circuito, visto que a fonte de alimentação utilizada corrente continua e para que se tenha a indução do campo magnético é necessária que tenha alternância da corrente. Ainda se faz necessário a utilização de um resistor na base do transistor para limitar sua corrente de entrada.

Já a Bobina 2 será a receptora, na qual através da indução eletromagnética produzida pela primária também induzirá um campo magnético conduzindo assim corrente e fazendo com que acenda o LED.

Foram realizados alguns testes com diferentes tipos de bobinas emissoras e receptoras, totalizando em dezesseis testes – 8 bobinas primárias sobreposta ou não sobreposta, diâmetro maior ou diâmetro menor, 30 espiras ou quarenta espiras e 8 bobinas secundárias seguindo mesmo modelo anterior. Além disso, foi necessária a utilização de um osciloscópio digital (Minipa Mo-2050 50mhz) para medir a tensão pico a pico e com isso calcular a corrente – através da Lei de Ohm – que foi induzida na bobina secundária, assim, foi possível determinar uma bobina primária e secundária mais eficiente para esse projeto.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Teoria do acoplamento eletromagnético

As investigações a respeito da possibilidade de se transmitir energia elétrica sem o uso de fios condutores tiveram início com o físico e engenheiro Nikola Tesla por volta de 1890. Empregando uma técnica que faz uso da ressonância de circuitos elétricos, Tesla efetuou a transmissão de energia elétrica através de ondas eletromagnéticas (CARLSON, 2007, p. 45).

A existência das ondas eletromagnéticas foi prevista pelo físico e matemático James Clerk Maxwell em 1864 e foram posteriormente comprovada por Heinrich Hertz em 1887. Ondas eletromagnéticas geradas por um circuito elétrico são capazes de influenciar outro circuito, mesmo não havendo conexão condutiva entre eles. Este fenômeno é conhecido como indução magnética, explicada pela Lei de Faraday, umas das leis fundamentais que compõe a base do eletromagnetismo clássico (SADIKU, 2004, p. 546).

De acordo com os experimentos de Faraday, um campo magnético estático não produz fluxo de corrente, mas um campo magnético variável no tempo produz uma tensão induzida, denominada força eletromotriz ( $f_{em}$ ) em um circuito fechado, o que causa um fluxo de corrente.

Faraday descobriu que a  $f_{em}$  induzida,  $V_{f_{em}}$ , medida em Volts (V), em qualquer circuito fechado, é igual à taxa de variação no tempo do fluxo magnético enlaçado pelo circuito. A Lei de Faraday pode ser expressa pela equação 1:

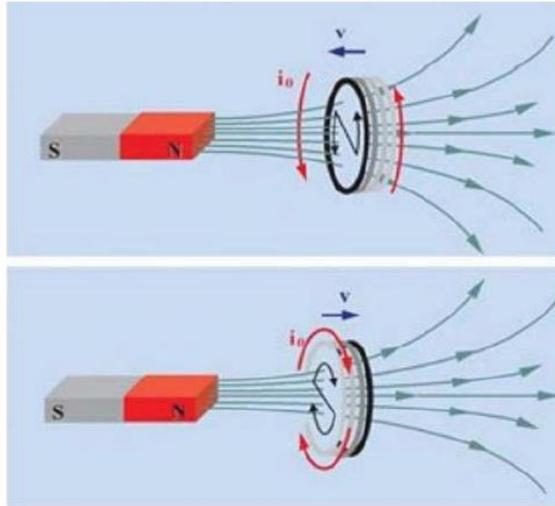
$$V_{f_{em}} = -N * \frac{d\Psi}{dt} \quad (1)$$

na qual N é o número de espiras no circuito e  $\Psi$  é o fluxo em cada espira.

O sinal negativo mostra que a tensão induzida age de tal forma a se opor ao fluxo que a produz. Essa propriedade é conhecida como Lei de Lenz, em homenagem a Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865). A Lei de Lenz destaca o fato de que o sentido de fluxo da corrente no circuito é tal que o campo magnético produzido pela corrente induzida se oponha ao campo magnético original (SADIKU, 2004, p. 336).

Na Figura 2 a Lei de Lenz é ilustrada.

Figura 2 – Lei de Lenz



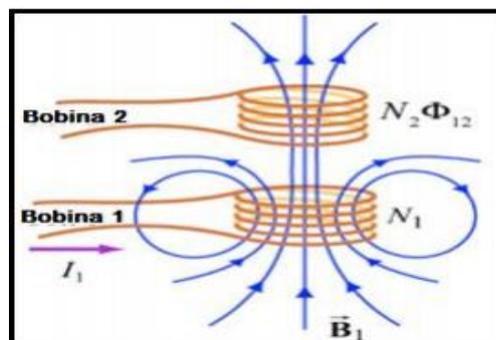
Fonte: Sagiorato (2017)

A maneira de se obter esta transferência de energia eficiente se deu através da busca de um sistema que possibilitasse captar energia de forma que a mesma não fosse irradiada, a fim de diminuir as perdas, e que possibilitasse o consumo de energia apenas quando a carga exigisse (ABREU, 2012). O acoplamento magnético é um fenômeno que tem essas características.

### 3.1.1 Indutância mútua e acoplamento indutivo

Duas bobinas estão posicionadas como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Bobinas acopladas eletromagneticamente através do fluxo magnético



Fonte: Ribeiro e Santos (2016)

Na primeira bobina, tem-se um determinado número de espiras,  $N_1$ , e por ela atravessa uma corrente  $I_1$ , que origina um campo magnético  $\vec{B}_1$ . Já a segunda bobina possui  $N_2$  espiras. Como as duas bobinas estão próximas, algumas das linhas de campo magnético que atravessam a 1ª bobina também irão passar através da 2ª bobina.

Seja  $\Phi_{12}$  o fluxo magnético através de uma espira da bobina 2, devido à corrente  $I_1$ . Variando-se  $I_1$  com o tempo, induzirá uma força eletromotriz, associada com o fluxo magnético variável na segunda bobina, dada pela equação (RIBEIRO e SANTOS, 2016):

$$\varepsilon_{12} = -N_2 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = - \frac{d}{dt} \iint_{\text{bobina 2}} \vec{B}_1 \cdot d\vec{A}_2 \quad (2)$$

A taxa de variação do fluxo magnético  $\Phi_{12}$  na bobina 2 é proporcional a taxa da variação de corrente na bobina 1:

$$N_2 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = M_{12} \frac{di_1}{dt} \quad (3)$$

em que a constante  $M_{12}$  é chamada de indutância mútua. Também pode ser escrita como:

$$M_{12} = \frac{N_2 \Phi_{12}}{I_1} \quad (4)$$

Existe indutância mútua entre dois indutores quando a sua posição relativa é de tal modo que as linhas de fluxo geradas a partir de uma bobina atravessam a outra bobina. Nesta condição, os dois indutores estão indutivamente acoplados. Indutância mútua pode ser definida, também, como a tensão induzida no segundo circuito quando a corrente no primeiro circuito varia em relação ao tempo. Se a corrente no primeiro circuito é senoidal, a indutância mútua entre duas bobinas pode ser expressa (RIBEIRO e SANTOS, 2016):

$$M = - \frac{V_2}{j\omega I_1} \quad (5)$$

Reordenando a equação (5), pode-se definir a equação da impedância mútua, na qual o sinal negativo indica que a tensão induzida está  $90^\circ$  atrasada da corrente elétrica no primário. Com isso, temos:

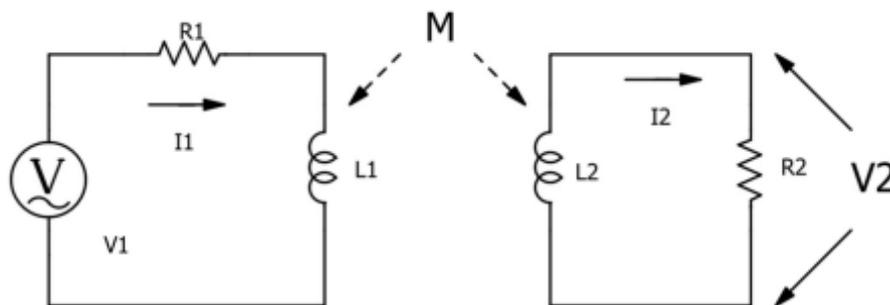
$$Z_M = j\omega M = - \frac{V_2}{I_1} \quad (6)$$

O valor máximo de indutância mútua que pode existir entre duas bobinas de indutância  $L_1$  e  $L_2$  é  $\sqrt{L_1 L_2}$ , e esse fenômeno ocorre quando todas as linhas de fluxo de uma bobina atravessam as espiras da outra. O fator de acoplamento ou coeficiente de acoplamento pode ser definido como a razão entre a indutância mútua,  $M$ , para o valor máximo possível,  $\sqrt{L_1 L_2}$ , ou seja (RIBEIRO e SANTOS, 2016):

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (7)$$

Dada à importância do fator de acoplamento, torna-se indispensável conhecer como  $k$  varia em função da distancia entre as bobinas. Na Figura 4 é mostrado um circuito que representa o acoplamento magnético entre duas bobinas.

Figura 4 – Circuito para medição do fator de acoplamento



Fonte: Silva (2017)

Neste circuito, pode-se observar a seguinte equação 8 e equação 9 de malha do primário e secundário respectivamente:

$$V_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} - R_1 i_1 + M \frac{di_2}{dt} = 0 \quad (8)$$

$$M \frac{di_1}{dt} - R_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} = 0 \quad (9)$$

Com o circuito secundário aberto ( $Z_L = \infty$ )  $i_2 = 0$ . Considerando ainda que a resistência do primário ( $R_1$ ) é muito pequena comparado com o valor da reatância indutiva ( $X_{L1}$ ) pode-se simplificar as equações 8 e 9 respectivamente (SILVA, 2017):

$$V_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} = 0 \quad (10)$$

$$V_2 = M \frac{di_1}{dt} \quad (11)$$

Combinado as equações 10 e 11 tem-se:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{M}{L_1} \quad (12)$$

Aplicando a equação 7 em 12, obtém-se  $k$ :

$$k = \frac{V_2}{V_1} \frac{L_1}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (13)$$

Os principais fatores que interferem no fator de acoplamento entre as bobinas são:

- Distância de separação entre as bobinas;
- Diâmetro da bobina primária e secundária;
- Alinhamento entre as bobinas;

Outro parâmetro é utilizado para o fator de qualidade representa, do ponto de vista físico, a energia armazenada em um sistema dividido pela energia perdida em cada ciclo de funcionamento. Em um circuito RLC de segunda ordem, o fator de qualidade  $Q$  se relaciona à razão entre a impedância total e a resistência total do circuito na frequência de ressonância  $\omega_n$ . Fator de qualidade pode ser definido como uma indicação da quantidade de energia que é armazenada (transferida de modo

contínuo de um elemento reativo para outro) em comparação com a energia dissipada pelo circuito em um período quando este está em ressonância (RIBEIRO e SANTOS, 2016).

$$Q = 2\pi \frac{E_A}{E_D} \quad (14)$$

onde:

$E_A$  = Energia armazenada no sistema

$E_D$  = Energia dissipada em um período de ressonância

No circuito RLC, o pico de energia armazenada é  $(1/2) LI^2$ , enquanto a energia dissipada em um período é  $(I^2R/2f)$ . Logo:

$$Q = 2\pi \frac{\frac{LI^2}{2}}{\frac{RI^2}{2f}} = \frac{2\pi fL}{R} \quad (15)$$

Portanto, os valores razoavelmente altos  $Q$  para as bobinas com uma frequência de operação são necessárias, de modo a atingir a eficiência de transferência de energia satisfatória. A eficiência no link indutivo é definida sendo a razão entre a potência fornecida à carga e a energia da bobina primária (ADEEB, 2006, p. 18). Alguns pressupostos geralmente são feitos, para proceder ao estudo da eficiência do link magnético:

- i) Ressonância série ou paralela são utilizadas para o enrolamento secundário;
- ii) O mecanismo de perda primária é devido ao fator não-ideal de acoplamento entre as bobinas;
- iii) Perda também ocorre devido ao fator de qualidade finito das bobinas;
- iv) A carga é puramente resistiva.

Em grande maioria das referências estudadas para desenvolver este trabalho, utilizou-se um capacitor adicionado na bobina secundária para sintonizar os circuitos. Conforme Adeeb (2006, p. 42) o capacitor ressonante cancela a reatância, em ressonância série, ou admitância, em ressonância paralela, da bobina secundária, Desta forma, a carga vista na bobina primaria é resistiva. Schuylenbergh

(1998, apud ADEEB, 2006, p. 24)<sup>1</sup> demonstra que o uso de ressonância série ou paralelo no secundário atinge uma eficiência de acoplamento ótima (RIBEIRO e SANTOS, 2016).

Sendo assim, a eficiência total da bobina indutiva para uma ressonância paralela secundária, pode ser escrita como:

$$\eta = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{\left(1 + \frac{Q_2}{\alpha} + k^2 Q_1 Q_2\right) \left(\alpha + \frac{1}{Q_2}\right)} \quad (16)$$

Para o secundário com a ressonância em série a expressão torna-se:

$$\eta = \frac{k^2 Q_1 \alpha}{\left(1 + \frac{1}{Q_2} + k^2 Q_1\right) \left(\alpha + \frac{1}{Q_2}\right)} \quad (17)$$

onde:

$Q_1$  = Fator de qualidade da bobina primária;

$Q_2$  = Fator de qualidade da bobina secundária;

$k$  = Fator de acoplamento entre as bobinas;

$\alpha$  = Constante adimensional =  $\omega C_2 R_L$ ;

$\omega$  = Frequência angular de operação;

$C_2$  = Capacitância do capacitor ressonante do secundário;

$R_L$  = Resistência da carga.

Ribeiro (2016, apud Schulenberg 1998) afirma que caso o primário esteja sintonizado em serie e o secundário sintonizado em paralelo, a eficiência do *link* pode ser descrita como o produto da eficiência do circuito primário e a eficiência do circuito secundário dada respectivamente por:

$$\eta_{prim} = \frac{R_{eq}}{R_{eq} + R_{L1}} \quad (18)$$

$$\eta_{sec} = \frac{Q_{L2}}{\alpha + Q_{L2}} \quad (19)$$

onde,

$R_{eq} = k^2 \omega L_2 \cdot \alpha Q_{12} \cdot (\alpha + Q_{12})^{-1}$  = resistência equivalente do circuito secundário;

$$\alpha = \omega C_2 R_L$$

$$Q_{L1} = \frac{\omega L_1}{R_{L1}}$$

$$Q_{L2} = \frac{\omega L_2}{R_{L2}}$$

Segundo Ribeiro e Santos (2016), uma melhor otimização da eficiência pode ser atingida mantendo  $R_{L1}$  o menor possível, visto que o mesmo é proporcional ao número de voltas da bobina, e pela escolha de um dado valor ideal para  $\alpha$ .

A eficiência global é dependente do fator de acoplamento,  $k$ , cujo é determinado pelo tamanho da bobina, o espaçamento e o alinhamento entre elas.

### 3.1.2 Desempenho de um link indutivo

É de grande importância saber quais os fatores influênciam diretamente e indiretamente no desempenho do *link* indutivo para ter um melhor rendimento.

- i) Dimensões e número de voltas da bobina: a transferência média ou o ganho de tensão de um link indutivo varia proporcionalmente com o quadrado do diâmetro da bobina de receptor (secundário), e inversamente com o diâmetro da bobina de transmissão (principal) (HEETDERKS, 1988). Visto que a indutância própria e a mútua das bobinas também variam proporcionalmente com os seus diâmetros, o fator de acoplamento e a eficiência do link também aumentam com diâmetros crescentes. Embora o fator de acoplamento entre duas bobinas seja independente do seu número de espiras, a indutância mútua, e, conseqüentemente, a transferência média de tensão, é proporcional ao produto do número de voltas das bobinas do transmissor e receptor (RIBEIRO e SANTOS, 2016).
- ii) Alinhamento e espaçamento entre bobinas: um pequeno aumento na separação entre as bobinas pode reduzir significativamente o acoplamento entre elas, resultando em uma perda no ganho. Além disso, a variação no alinhamento da bobina muda a indutância mútua e o ganho do *link* (RIBEIRO e SANTOS, 2016).
- iii) Frequência de operação: a frequência de operação influencia vários aspectos de um *link* indutivo. A impedância mútua e a transferência de tensão são mais

satisfatórias com altas frequências, além disso, a eficiência também é influenciada pela escolha da frequência (RIBEIRO e SANTOS, 2016).

### 3.2 Bobinas

Uma bobina, também conhecida como solenoide ou indutor, representada pela letra  $L$ , é um bipolo que pode armazenar energia magnética, transportada pela corrente que o atravessa. Indicado por  $\Psi$  o fluxo de indução magnética concatenado com a corrente do bipolo, o indutor linear é definido por uma relação do tipo:

$$\Psi = L(i) \quad (20)$$

onde  $\Psi$  é medido em Webers (Wb), se a corrente ( $i$ ) for medida em Ampères (A) (SAGIORATO, 2017).

A capacidade de armazenar energia é chamada de indutância e é medida em Henry (H), em homenagem ao cientista Joseph Henry (1797-1878), grande estudioso do fenômeno da autoindutância eletromagnética.

Um indutor é construído enrolando-se um fio condutor em forma de espiral. Cada volta do indutor é chamada de espira e a sua quantidade influencia diretamente na intensidade do campo magnético gerado.

Existem alguns tipos principais de bobinas que são:

- i) Bobinas com núcleo de ar: são aquelas que não utilizam material ferromagnético em seu núcleo, possuem baixa indutância e são utilizadas em altas frequências, pois não apresentam as perdas de energia causadas pelo núcleo, as quais aumentam consideravelmente com a frequência.
- ii) Bobinas com núcleo ferromagnético: são aquelas que apresentam matérias ferromagnéticas na composição do seu núcleo, aumentando em muito o valor da impedância, devido ao aumento e concentração do campo magnético. Porém, apresentam algumas perdas como corrente de Foucault, histerese e saturação.
- iii) Bobinas com núcleo laminado: esses tipos de bobinas são utilizados em transformadores e outros indutores que operam com uma frequência baixa. O núcleo é constituído por finas camadas de aço-silício que são envolvidas por

um verniz isolante. Esse verniz isolante é responsável em prevenir a formação de correntes parasitas e a utilização do silício juntamente com o aço reduz a histerese do material.

- iv) Bobinas com núcleo de ferrite: são compostas por um tipo de cerâmica ferromagnética não condutora, não apresentam correntes parasitas, além de baixa histerese. São utilizadas em altas frequências.
- v) Bobinas toroidais: em indutores em forma de bastão, o campo magnético circula não só pelo núcleo, mas também pelo ar entre uma extremidade e outra da bobina – causando grades perdas, diminuindo assim o valor da indutância. Geralmente um núcleo toroidal é composto de ferrite e possui formato de uma rosca, criando um caminho fechado para a circulação do campo magnético, fazendo com que se tenha um aumento no valor da indutância (SAGIORATO, 2017).

Na Figura 5, são ilustrados os modelos de bobinas citados acima.

Figura 5 – Modelos de bobinas



Fonte: Sagiorato (2017)

### 3.3 Transistor

Consiste em um dispositivo semicondutor, geralmente feito de silício ou germânio, usado para amplificar ou atenuar a intensidade da corrente elétrica em circuitos eletrônicos.

Os transistores apresentam duas funções básicas: amplificar a corrente elétrica ou barrar a sua passagem. Se tratando da função de amplificador, os transistores são alimentados por uma baixa corrente elétrica de entrada, amplificando-a e, assim, produzindo uma corrente elétrica de saída com maior intensidade (HELERBROCK, 2019).

Além disso, podem funcionar como interruptores, ligando ou desligando a corrente elétrica em um circuito: da mesma forma como eles são capazes de amplificar a corrente elétrica, também são capazes de atenuá-la, e esse processo pode ocorrer em uma grande velocidade.

A dopagem de um transistor é um processo em que se substituem os átomos de silício por outros átomos – fósforo, gálio, boro, dentre outros. A dopagem do tipo-n – carga negativa –, adicionam-se átomos à rede cristalina do silício capazes de fornecer um excesso de elétrons, já na dopagem do tipo-p – cargas positivas – adicionam átomos que diminuem os elétrons (HELERBROCK, 2019).

#### 3.3.1 Transistores NPN

Um transistor NPN, que é da dopagem do tipo-n (carga negativa), recebe tensão positiva para o terminal coletor e tensão positiva para o terminal base para operação adequada.

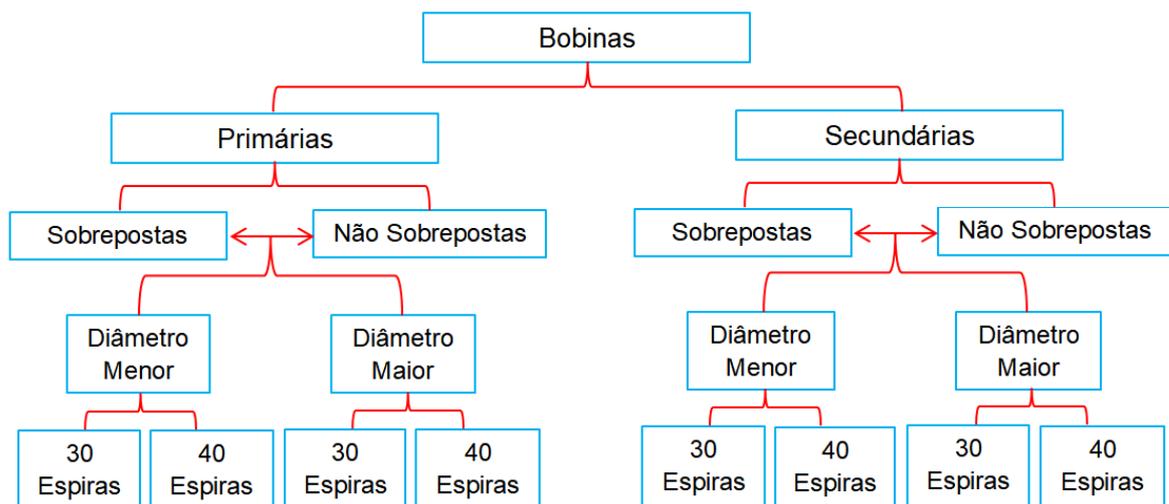
À medida que se aumenta a corrente para a base de um transistor NPN, o transistor é ativado cada vez mais até que ele conduza completamente do coletor para emissor. E à medida que se diminui a corrente para a base de um transistor NPN, o transistor liga menos até que o mesmo já não conduza de coletor para emissor e desliga.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 Construções das Bobinas

Para a construção das bobinas foi escolhida a com núcleo de ar, pois não apresentam as perdas de energia causadas pelo núcleo (material ferromagnético) e por serem utilizadas em altas frequências. Foi utilizado fio de cobre AWG 28 (com diâmetro 0,05106 cm), duas latas com diâmetros diferentes – sendo uma com 5,6 cm e outra com 6.6 cm (ambas medidas com paquímetro) – e número de espiras diferentes (30 espiras ou 40 espiras). A Figura 6 ilustra o fluxograma dos tipos de bobinas construídas.

Figura 6 – Fluxograma bobinas primárias e secundárias



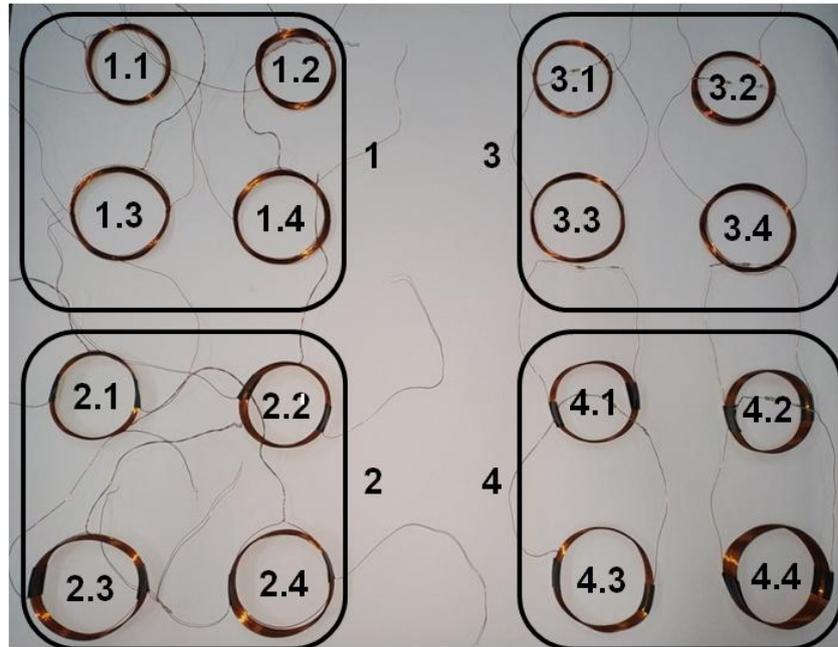
Fonte: Autores (2019)

Como visto anteriormente, foram construídas dezesseis bobinas para testes sendo oito bobinas primárias e oito bobinas secundárias. A bobina primária foi constituída com três conexões que foram ligadas ao circuito emissor e a bobina secundária com duas conexões que foram ligadas ao LED e posteriormente ao resistor, devido a corrente ser muito baixa e não sendo mensurável por sua escala nos aparelhos de medições como multímetro e amperímetro, conforme demonstrado na Figura 7.

As bobinas da esquerda na Figura 7 correspondem às bobinas emissoras sobrepostas e não sobrepostas com diâmetro de 5,6 cm ( $D_1$ ) e 6,6 cm ( $D_2$ ) e com 30 espiras ( $N_1$ ) e 40 espiras ( $N_2$ ); as bobinas da direita correspondem às bobinas

receptoras sobrepostas e não sobrepostas com diâmetro  $D_1$  e  $D_2$  e com  $N_1$  e  $N_2$  espiras.

Figura 7 – Bobinas emissoras e receptoras, sobrepostas e não sobrepostas, com diâmetro maior e menor



Fonte: Autores (2019)

A Tabela 1 descreve mais especificamente as dezesseis bobinas representadas na Figura 7.

Tabela 1 – Descrição das Bobinas emissoras e receptoras

1	<b>Bobina Primária Sobreposta</b>		
	1.1	$D_1N_1$	Diâmetro de 5,6 cm e 30 Espiras
	1.2	$D_1N_2$	Diâmetro de 5,6 cm e 40 Espiras
	1.3	$D_2N_1$	Diâmetro de 6,6 cm e 30 Espiras
	1.4	$D_2N_2$	Diâmetro de 6,6 cm e 40 Espiras
2	<b>Bobina Primária Não Sobreposta</b>		
	2.1	$D_1N_1$	Diâmetro de 5,6 cm e 30 Espiras
	2.2	$D_1N_2$	Diâmetro de 5,6 cm e 40 Espiras
	2.3	$D_2N_1$	Diâmetro de 6,6 cm e 30 Espiras
	2.4	$D_2N_2$	Diâmetro de 6,6 cm e 40 Espiras
3	<b>Bobina Secundária Sobreposta</b>		

	3.1	D <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	Diâmetro de 5,6 cm e 30 Espiras
	3.2	D <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	Diâmetro de 5,6 cm e 40 Espiras
	3.3	D <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	Diâmetro de 6,6 cm e 30 Espiras
	3.4	D <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	Diâmetro de 6,6 cm e 40 Espiras
4	<b>Bobina Secundária Não Sobreposta</b>		
	4.1	D <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	Diâmetro de 5,6 cm e 30 Espiras
	4.2	D <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	Diâmetro de 5,6 cm e 40 Espiras
	4.3	D <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	Diâmetro de 6,6 cm e 30 Espiras
	4.4	D <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	Diâmetro de 6,6 cm e 40 Espiras

Fonte: Autores (2019)

## 4.2 Parâmetros para os testes

De início, foi definido uma tensão e corrente de entrada para a fonte CC, sendo a tensão de 6,0V e a corrente de 0,07A (Figura 9), porém para os teste em que se variavam as bobinas emissoras não foi possíveis manter o mesmo valor de corrente sendo reajustada para 0,06A – a fonte não permitiu colocar os valores de 6,0V e 0,07A – (Figura 19).

Em testes iniciais não foram possíveis coletar valores de corrente nas bobinas receptoras – conectadas ao LED – devido a mesma ser muito baixa e os instrumentos utilizados para medição não conseguirem mensura-las por sua escala de trabalho conforme já citado anteriormente. Com isso, viu-se a necessidade de substituir o LED por um resistor de 100KΩ, escolhido de forma aleatória, e utilizando o osciloscópio foi possível obter a tensão pico a pico ( $V_{pp}$ ), medida a partir da parte superior da forma de onda, chamada de crista, que vai até a parte inferior da forma de onda, chamada de calha, e assim, obter a tensão de pico ( $V_p$ ) que é a tensão máxima.

A Lei de Ohm estabelece que a tensão em um resistor seja diretamente proporcional a corrente que atravessa o mesmo, sendo que a constante de proporcionalidade entre a tensão e a corrente é a resistência do resistor (KUROKAWA, 2013). A Lei de Ohm é definida pela equação 21:

$$V_p(t) = R * i(t) \quad (21)$$

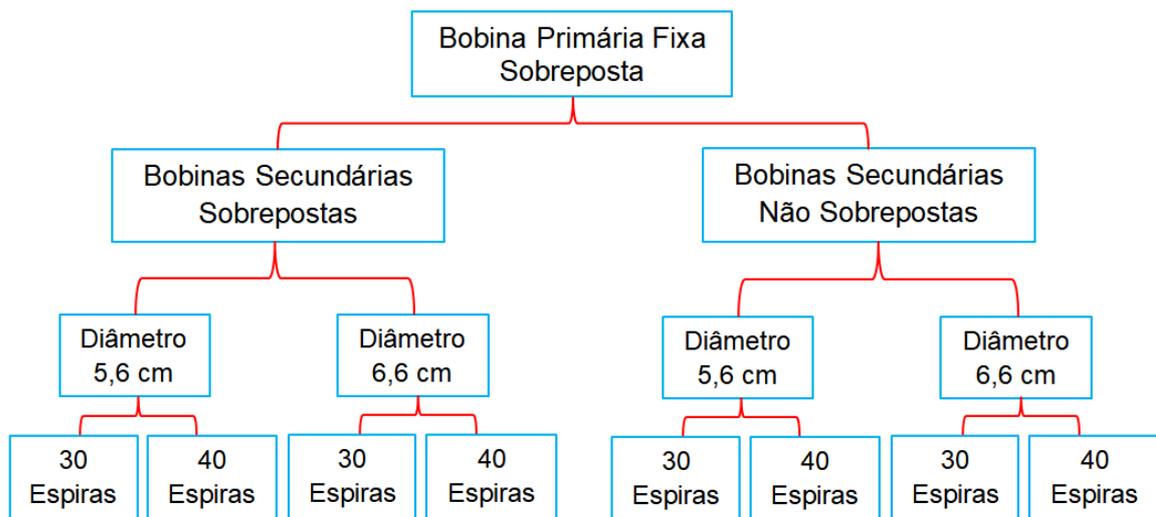
Manipulando essa equação, foi possível obter a corrente na bobina receptora e ter parâmetros para comparar a eficiência das bobinas no projeto.

Outra questão que deve ser ressaltada, foi que quanto mais se distanciava a bobina emissora da receptora aumentava as perdas, com isso, foi estipulada que as bobinas estivessem muito próximas para medir a maior eficiência das mesmas.

#### 4.3 Bobina emissora fixa e variando bobinas receptoras

A fim de ter um comparativo das bobinas receptoras, foi escolhida uma bobina primária fixa – sobreposta de diâmetro  $D_2$  e com  $N_2$  espiras – e variando as bobinas secundárias quanto ao diâmetro, número de espiras e sobrepostas ou não sobrepostas. A Figura 8 ilustra o fluxograma dos oito testes que foram realizados.

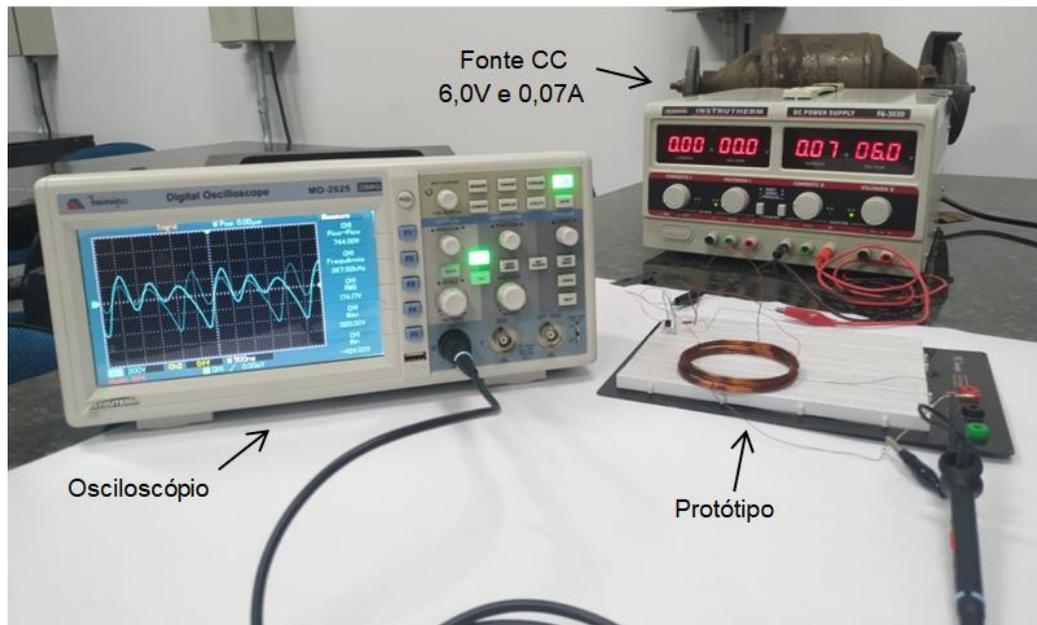
Figura 8 – Fluxograma bobina emissora fixa e as variações das bobinas receptoras



Fonte: Autores (2019)

A Figura 9 mostra a tensão e a corrente para alimentação do circuito primário para todos os testes realizados, além de mostrar o protótipo em funcionamento.

Figura 9 – Demonstração do protótipo

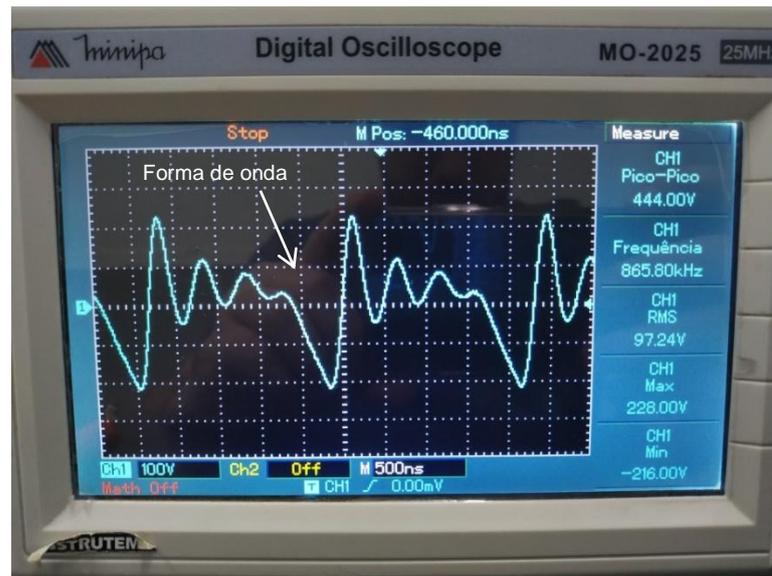


Fonte: Autores (2019)

#### 4.3.1 Testes com bobina emissora $D_2N_2$ e receptoras sobrepostas

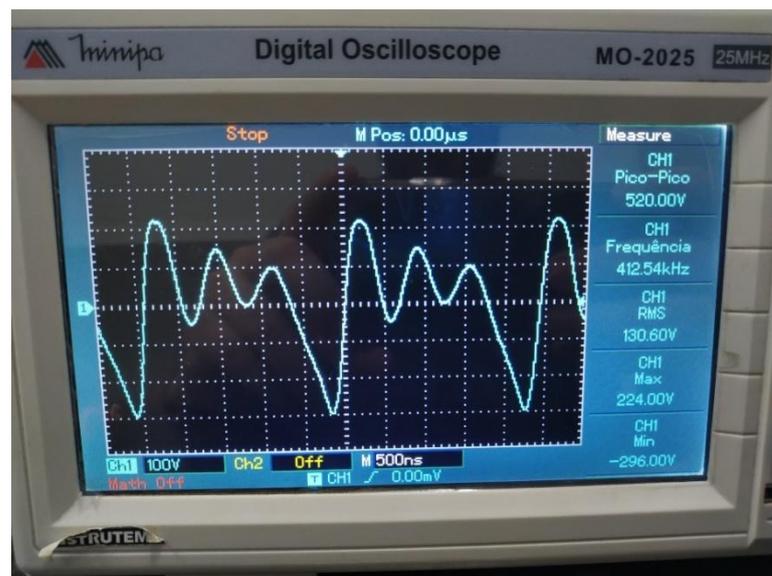
Variando apenas as bobinas receptoras sobrepostas em diâmetro e em número de espiras foram obtidas, no osciloscópio, as tensões pico a pico, frequências e formas de ondas para os quatro testes de bobinas receptoras sobrepostas (Figura 10, Figura 11, Figura 12 e Figura 13).

Figura 10 – Bobina emissora sobreposta  $D_2N_2$  e receptora sobreposta  $D_1N_1$



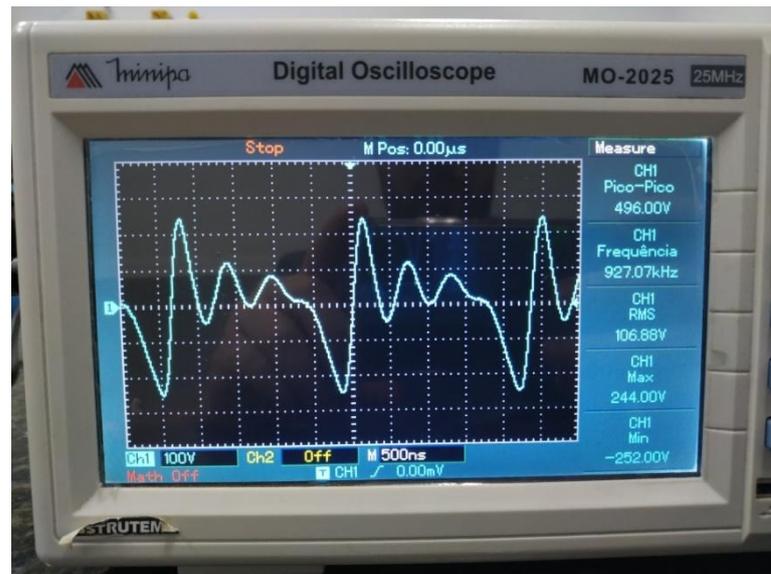
Fonte: Autores (2019)

Figura 11 – Bobina emissora sobreposta  $D_2N_2$  e receptora sobreposta  $D_1N_2$



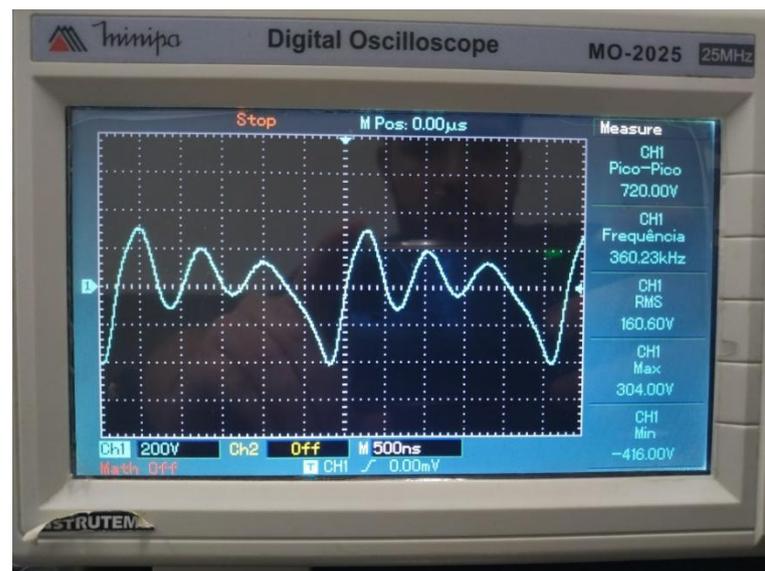
Fonte: Autores (2019)

Figura 12 – Bobina emissora sobreposta  $D_2N_2$  e receptora sobreposta  $D_2N_1$



Fonte: Autores (2019)

Figura 13 – Bobina emissora sobreposta  $D_2N_2$  e receptora sobreposta  $D_2N_2$

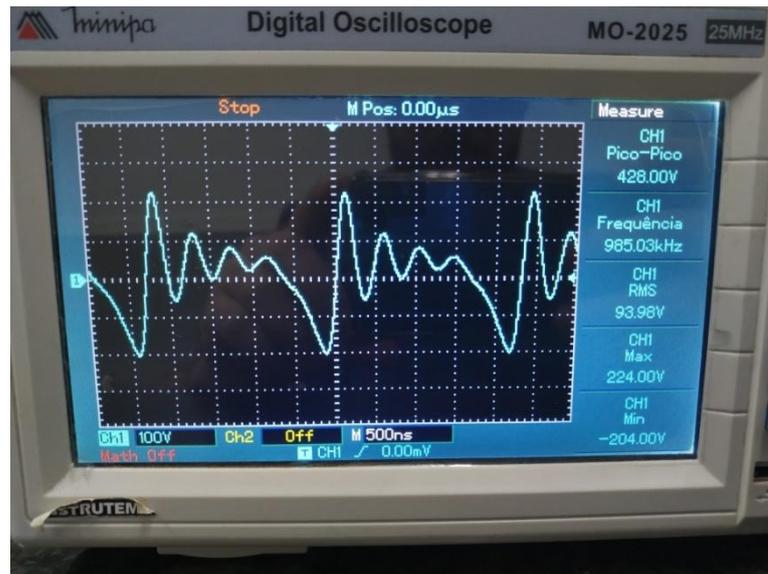


Fonte: Autores (2019)

#### 4.3.2 Testes com bobina emissora $D_2N_2$ e receptoras não sobrepostas

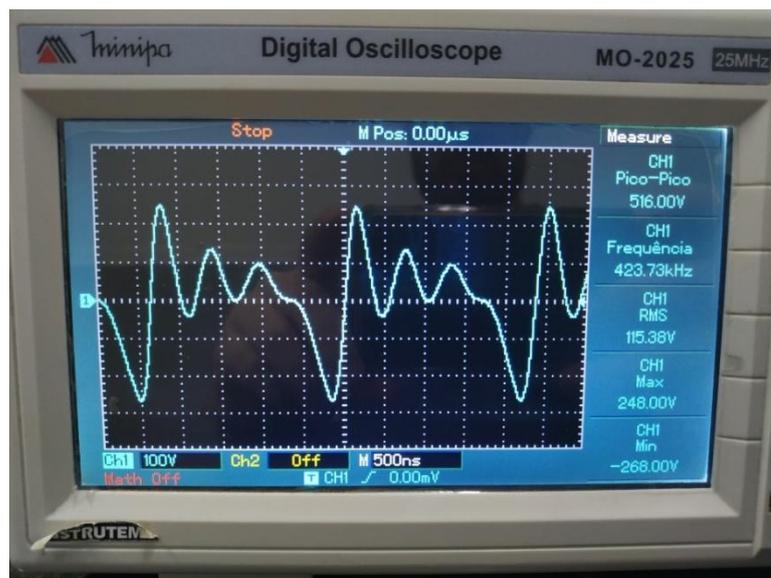
Variando apenas as bobinas receptoras não sobrepostas em diâmetro e em número de espiras foram obtidas, no osciloscópio, as tensões pico a pico, frequências e formas de ondas para os quatro testes de bobinas receptoras não sobrepostas (Figura 14, Figura 15, Figura 16 e Figura 17).

Figura 14 – Bobina emissora sobreposta  $D_2N_2$  e receptora não sobreposta  $D_1N_1$



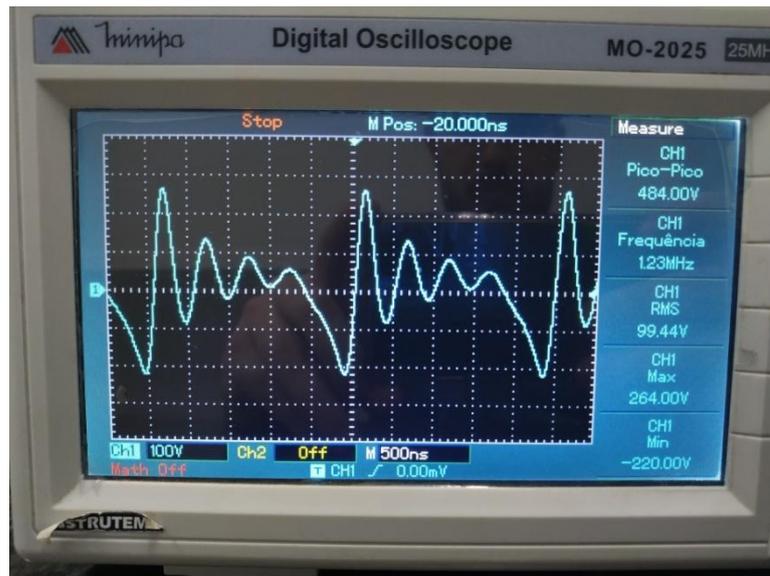
Fonte: Autores (2019)

Figura 15 – Bobina emissora sobreposta  $D_2N_2$  e receptora não sobreposta  $D_1N_2$



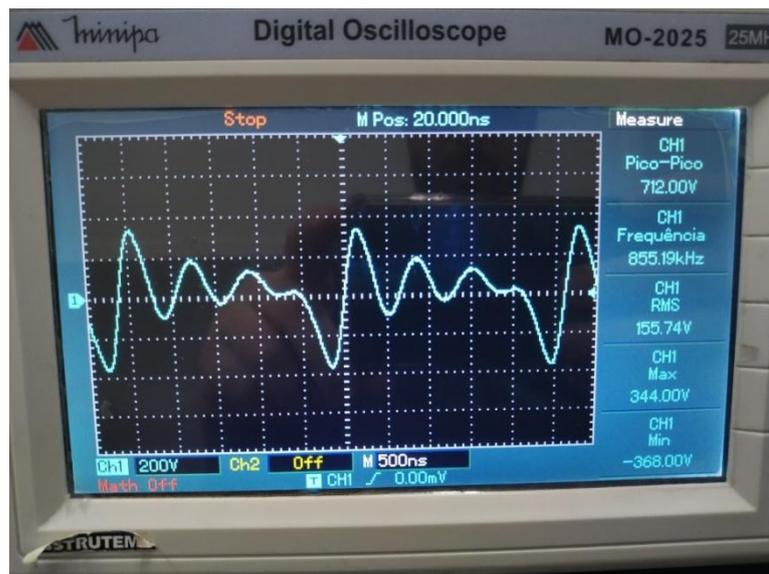
Fonte: Autores (2019)

Figura 16 – Bobina emissora sobreposta  $D_2N_2$  e receptora não sobreposta  $D_2N_1$



Fonte: Autores (2019)

Figura 17 – Bobina emissora sobreposta  $D_2N_2$  e receptora não sobreposta  $D_2N_2$



Fonte: Autores (2019)

#### 4.3.3 Comparativo entre bobinas receptoras sobrepostas e não sobrepostas

Através das tensões pico a pico obtidas com a utilização do osciloscópio – Figura 10 à Figura 17 – foi possível encontrar as tensões de pico e utilizando a Lei de Ohm para calcular a corrente das bobinas secundárias sobrepostas e não sobrepostas. Na Tabela 2 são demonstrados as  $V_{pp}$  e  $V_p$  medidas em Volts (V), o

resistor medido em Kiloohm ( $K\Omega$ ), a corrente medida em Miliampère (mA) e a frequência medida em Kiloherz (KHz) das bobinas receptoras.

Tabela 2 – Resultados obtidos para bobina emissora sobreposta  $D_2N_2$  fixa e receptoras sobrepostas e não sobrepostas

<b>BOBINA PRIMÁRIA FIXA SOBREPOSTA <math>D_2N_2</math></b>					
<b>SECUNDÁRIA SOBREPOSTA</b>					
<b>BOBINAS</b>	<b><math>V_{pp}</math> (V)</b>	<b><math>V_p</math> (V)</b>	<b>R (<math>K\Omega</math>)</b>	<b>i (mA)</b>	<b>f(KHz)</b>
D <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	444,00	222,00	100,00	2,20	865,80
D <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	520,00	260,00	100,00	2,60	412,54
D <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	496,00	248,00	100,00	2,48	927,07
D <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	720,00	360,00	100,00	3,60	360,23
<b>SECUNDÁRIA NÃO SOBREPOSTA</b>					
D <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	428,00	214,00	100,00	2,14	985,03
D <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	516,00	258,00	100,00	2,58	423,73
D <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	484,00	242,00	100,00	2,42	1230,00
D <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	712,00	356,00	100,00	3,56	855,19

Fonte: Autores (2019)

Levando em consideração a bobina emissora sendo sobreposta com diâmetro de 6,6 cm e 40 espiras foi possível chegar as seguintes conclusões:

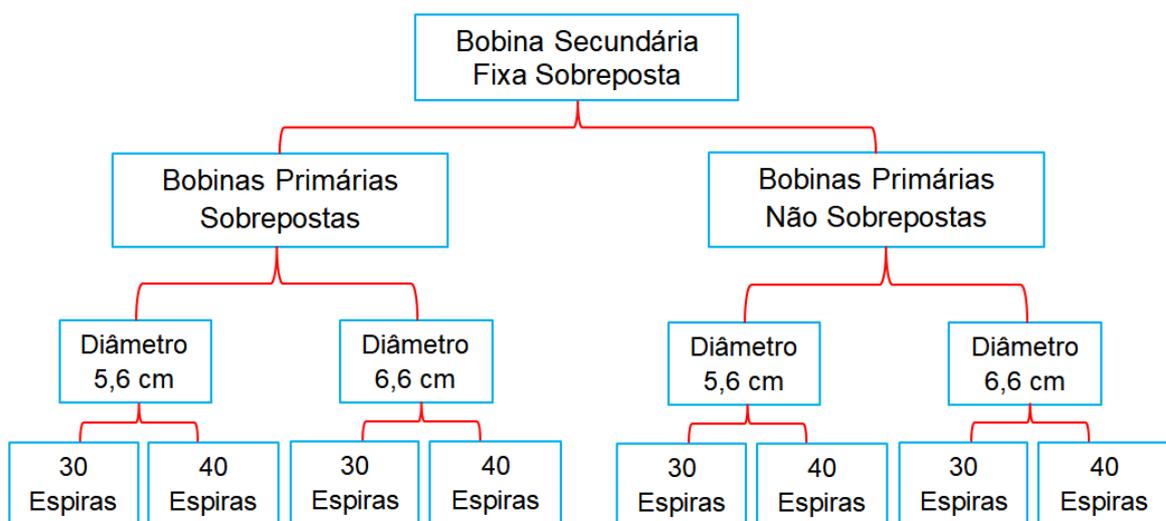
- i) A bobina primária sobreposta, com maior diâmetro e maior número de espira possuiu melhores parâmetros físicos para indução do campo na bobina secundária – devido à indutância mutua ser diretamente proporcional ao número de espiras e, conseqüentemente, o fluxo magnético. Com isso aumenta-se a corrente na secundária;
- ii) Tanto nas bobinas receptoras sobrepostas quanto nas não sobrepostas, aumentando o diâmetro e o número de espiras aumenta a indutância mutua e conseqüentemente tem-se uma maior corrente;
- iii) A razão para o conjunto de espiras sobrepostas terem maior eficiência do que o conjunto de espiras não sobrepostas deve-se ao fato de que, no primeiro caso, algumas espiras possuem um diâmetro ligeiramente maior do que no segundo caso e, em conseqüência disso, o fluxo magnético também é ligeiramente maior, tanto para a primária quanto para a secundária, com o mesmo número de espiras;

- iv) Um fato observado foi às formas de onda não serem uma senoide, estas apresentam harmônicas devido ao transistor funcionar como um componente eletrônico não linear – descontinuidades na corrente devido ao chaveamento;
- v) A indutância mútua está diretamente relacionada ao fluxo magnético entre as bobinas emissora e receptora. O fluxo magnético é diretamente proporcional ao número de espiras, ou seja, quando aumenta-se o número de espiras tem-se conseqüentemente o aumento da indutância mútua. A queda da frequência pode ser notada devido ao aumento de espiras, visto que a frequência é inversamente proporcional à indutância mútua;
- vi) Outro fator para ter altas frequências (KHz) é devido à alta velocidade de chaveamento do transistor.

#### 4.4 Bobina receptora fixa e variando bobinas emissoras

Foi escolhida a mesma relação de diâmetro e espiras para a bobina secundária fixa – sobreposta de diâmetro  $D_2$  e com  $N_2$  espiras – a fim de ter um comparativo das bobinas emissoras variando quanto ao diâmetro, número de espiras e sobrepostas ou não sobrepostas, além de ter um parâmetro para comparar com os resultados obtidos anteriormente. A Figura 17 ilustra o fluxograma dos oito testes que foram realizados.

Figura 18 – Fluxograma bobina receptora fixa e as variações das bobinas emissoras

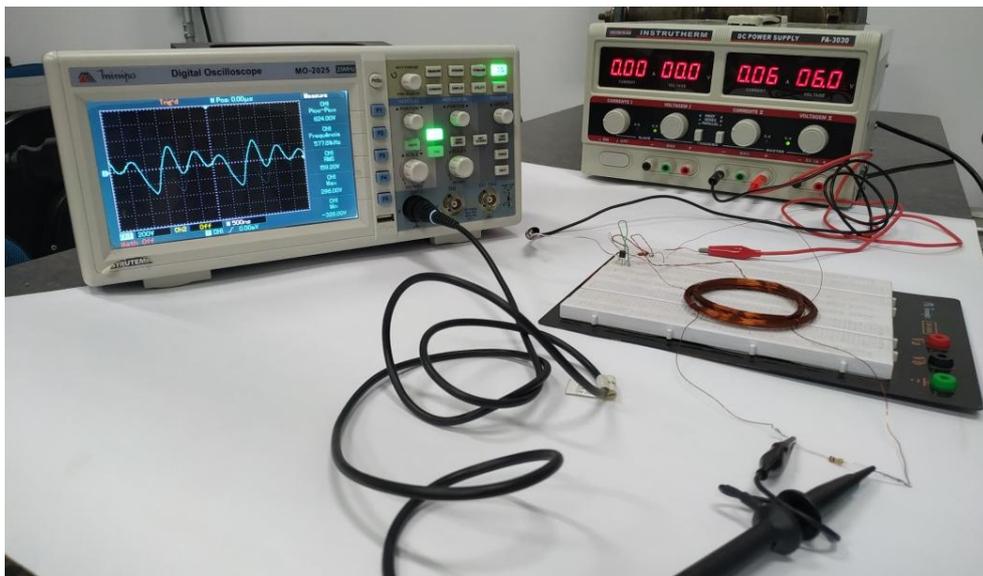


Fonte: Autores (2019)

Inicialmente foram mantidos os mesmos parâmetros de tensão e corrente para alimentação do circuito primário – como foi mostrado na Figura 9 – porém, ao realizar os testes não foi possível ajustar a fonte em 6,0V e 0,07A (a fonte não permitia estabelecer esses valores, ajustava a corrente aumentava a tensão ou ajustava a tensão diminuía a corrente) sendo necessário apenas o ajuste da corrente para 0,06A. Foi observada que essa mínima variação da corrente do circuito emissor, não teve muita relevância nos resultados da tensão pico a pico medida na bobina secundária.

A Figura 19 mostra a tensão e a corrente para alimentação do circuito primário para todos os testes realizados, além de mostrar o protótipo em funcionamento.

Figura 19 – Demonstração do protótipo com ajuste na corrente

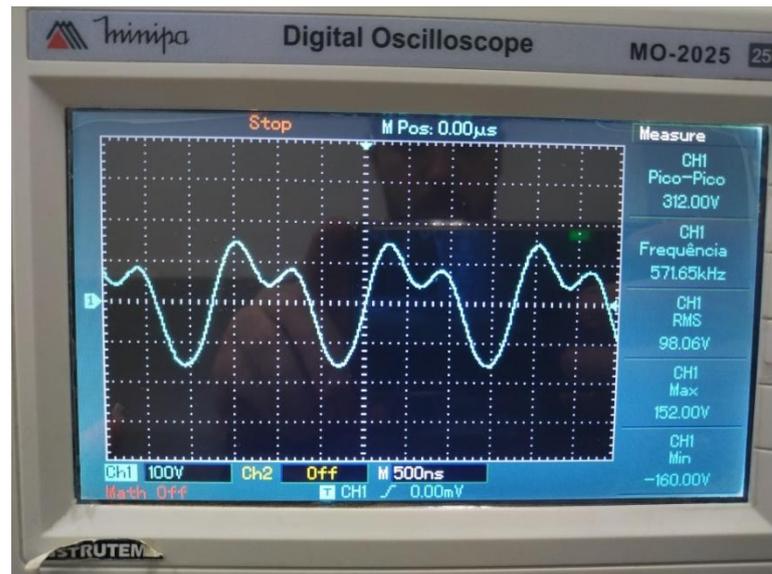


Fonte: Autores (2019)

#### 4.4.1 Testes com bobina receptora $D_2N_2$ e emissoras sobrepostas

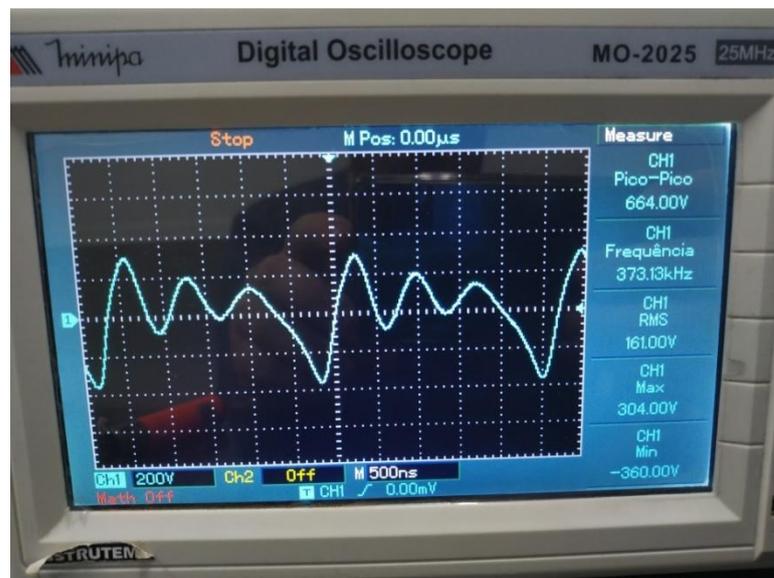
Variando apenas as bobinas emissoras sobrepostas em diâmetro e em número de espiras foram obtidas, no osciloscópio, as tensões pico a pico, frequências e formas de ondas para os quatro testes de bobinas emissoras sobrepostas (Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23).

Figura 20 – Bobina receptora sobreposta  $D_2N_2$  e emissora sobreposta  $D_1N_1$



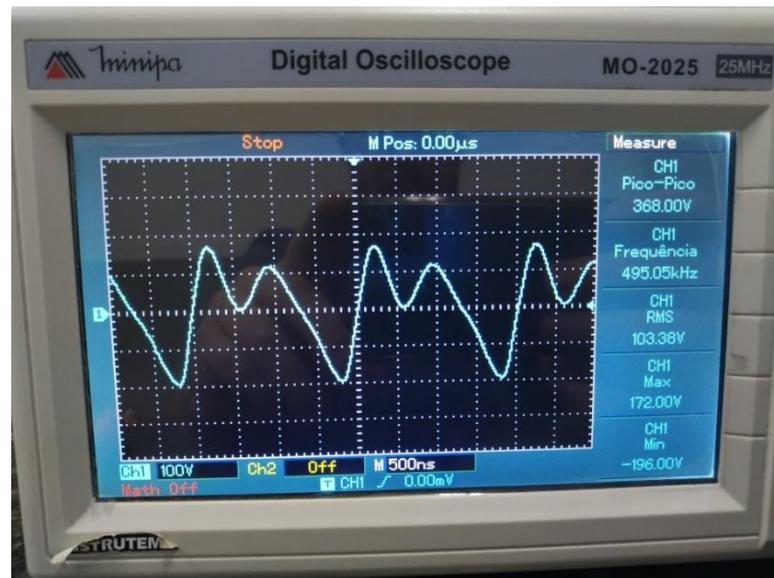
Fonte: Autores (2019)

Figura 21 – Bobina receptora sobreposta  $D_2N_2$  e emissora sobreposta  $D_1N_2$



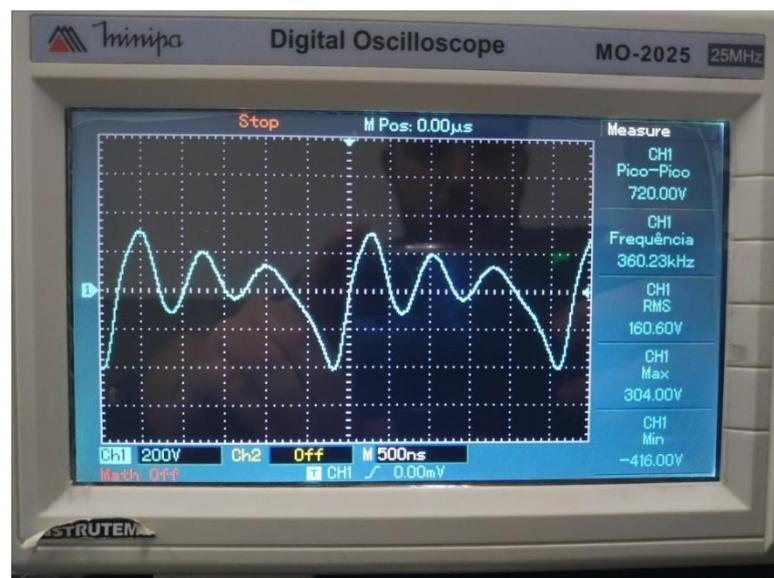
Fonte: Autores (2019)

Figura 22 – Bobina receptora sobreposta  $D_2N_2$  e emissora sobreposta  $D_2N_1$



Fonte: Autores (2019)

Figura 23 – Bobina receptora sobreposta  $D_2N_2$  e emissora sobreposta  $D_2N_2$

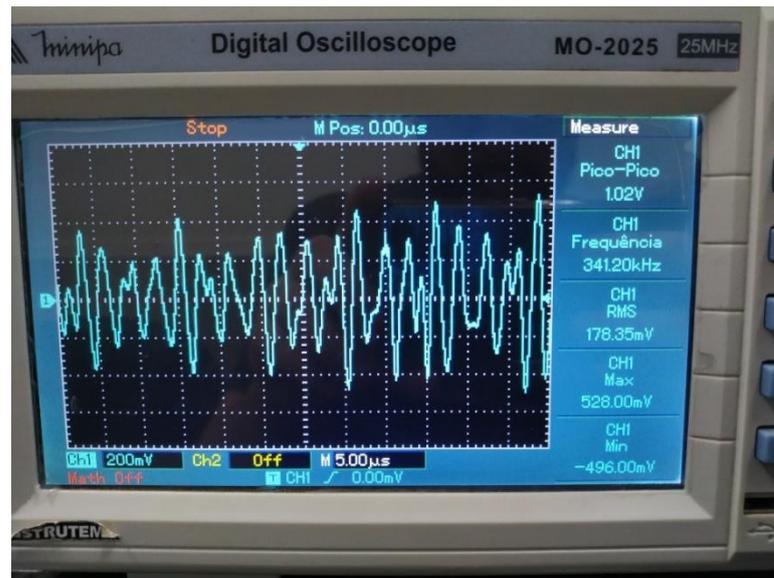


Fonte: Autores (2019)

#### 4.4.2 Testes com bobina receptora $D_2N_2$ e emissoras não sobrepostas

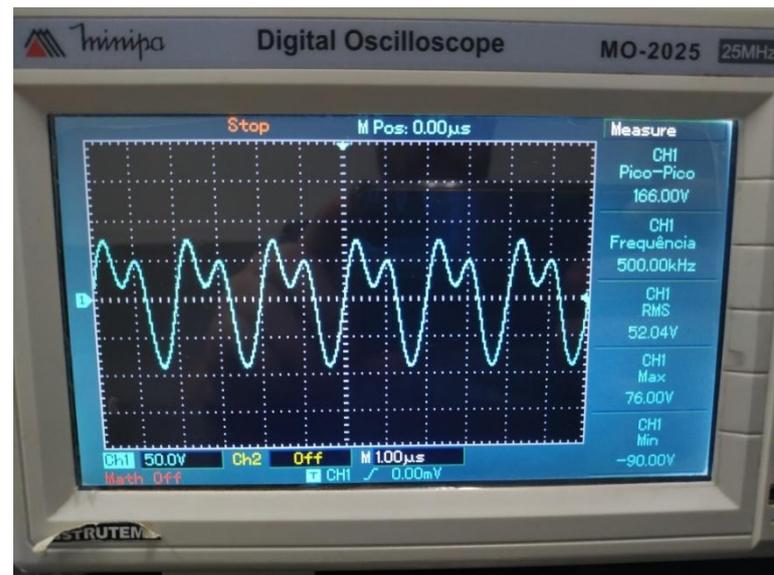
Variando apenas as bobinas emissoras não sobrepostas em diâmetro e em número de espiras foram obtidas, no osciloscópio, as tensões pico a pico, frequências e formas de ondas para os quatro testes de bobinas emissoras não sobrepostas (Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27).

Figura 24 – Bobina receptora sobreposta  $D_2N_2$  e emissora não sobreposta  $D_1N_1$



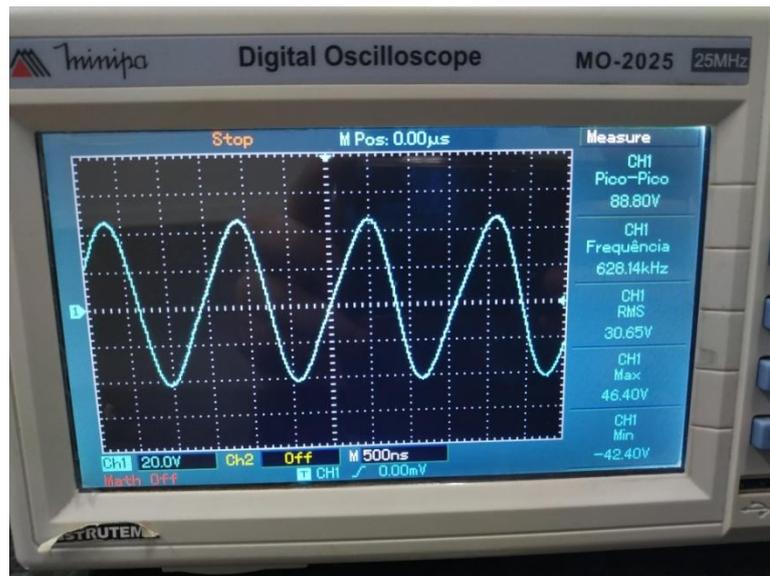
Fonte: Autores (2019)

Figura 25 – Bobina receptora sobreposta  $D_2N_2$  e emissora não sobreposta  $D_1N_2$



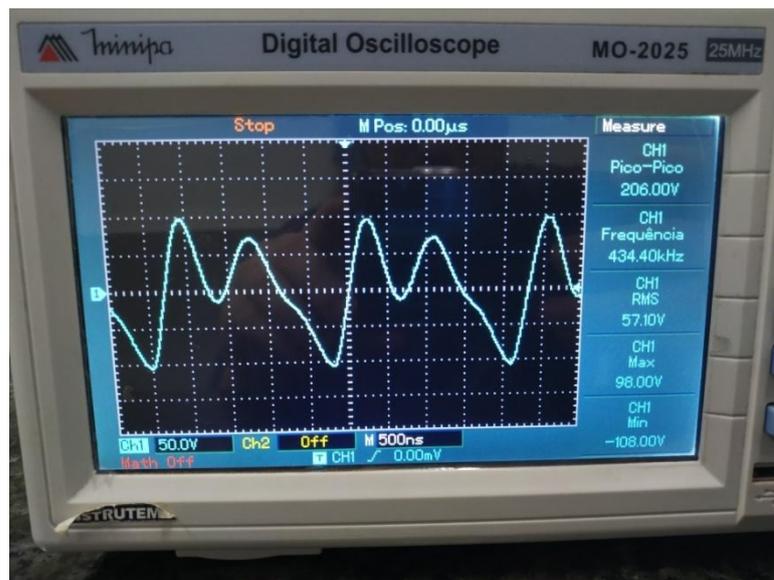
Fonte: Autores (2019)

Figura 26 – Bobina receptora sobreposta  $D_2N_2$  e emissora não sobreposta  $D_2N_1$



Fonte: Autores (2019)

Figura 27 – Bobina receptora sobreposta  $D_2N_2$  e emissora não sobreposta  $D_2N_2$



Fonte: Autores (2019)

#### 4.4.3 Comparativo entre bobinas emissoras sobrepostas e não sobrepostas

Como realizado nos testes anteriores, através das tensões de pico a pico obtidas com a utilização do osciloscópio – Figura 20 à Figura 27 – foi possível calcular a corrente das bobinas secundárias sobrepostas. Na Tabela 3 são demonstrados todos os dados obtidos das bobinas emissoras.

Tabela 3 – Resultados obtidos para bobina receptora sobreposta  $D_2N_2$  fixa e emissoras sobrepostas e não sobrepostas

<b>BOBINA SECUNDÁRIA FIXA SOBREPOSTA <math>D_2N_2</math></b>					
<b>PRIMÁRIA SOBREPOSTA</b>					
<b>BOBINAS</b>	<b><math>V_{pp}</math> (V)</b>	<b><math>V_p</math> (V)</b>	<b>R (K<math>\Omega</math>)</b>	<b>i (mA)</b>	<b>f(KHz)</b>
D <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	312,00	156,00	100,00	1,56	571,65
D <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	664,00	332,00	100,00	3,32	373,13
D <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	368,00	184,00	100,00	1,84	495,05
D <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	720,00	360,00	100,00	3,60	360,23
<b>PRIMÁRIA NÃO SOBREPOSTA</b>					
D <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	1,02	0,51	100,00	0,01	341,20
D <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	166,50	83,25	100,00	0,83	500,00
D <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	88,80	44,40	100,00	0,44	628,14
D <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	206,00	103,00	100,00	1,03	434,40

Fonte: Autores (2019)

Levando em consideração a bobina receptora sendo sobreposta com diâmetro de 6,6 cm e 40 espiras foi possível chegar as seguintes conclusões:

- i) Devido à bobina secundária ser sobreposta, com diâmetro maior e com o número de espiras também maior, exige uma maior indução do campo para ter uma maior corrente, com isso as bobinas primárias com menor diâmetro e menor número de espiras são menos eficientes (quanto menor o número de espiras menor o fluxo magnético);
- ii) Tanto nas bobinas emissoras sobrepostas quanto nas não sobrepostas, aumentando o diâmetro e o número de espiras aumenta a indutância mutua e consequentemente tem-se uma maior corrente;
- iii) Como já observado no caso anterior (item 4.3.3), foi às formas de onda não serem uma senoide, apresentam harmônicas devido ao transistor funcionar como um componente eletrônico não linear – descontinuidades na corrente devido ao chaveamento. Apenas no teste da bobina primária não sobreposta  $D_2N_1$  apresentou uma senoide quase perfeita, devido ao alinhamento quase perfeito das linhas de campo;
- iv) A indutância mutua está diretamente relacionada ao fluxo magnético entre as bobinas emissora e receptora. O fluxo magnético é diretamente proporcional ao número de espiras, ou seja, quando aumenta o número de espiras tem-se consequentemente o aumento da indutância mutua. A queda da frequência

pode ser notada devido ao aumento de espiras, visto que a frequência é inversamente proporcional à indutância mútua;

- v) Outro fator para ter altas frequências (KHz) é devido à alta velocidade de chaveamento do transistor, conforme citado anteriormente (item 4.3.3).

## 5 CONCLUSÃO

Com este trabalho, pode-se perceber que a transmissão de energia sem fio é possível, porém existem diversas variáveis que interferem diretamente na transmissão deste tipo de energia, desde a variação no alinhamento das bobinas (alterando as linhas de campo e sua indutância mútua), a um pequeno aumento na separação entre as bobinas (reduzindo o fluxo magnético), além disso, quanto menor o número de espiras, menor o campo induzido (devido ao fluxo magnético).

Outro fator observado foi que a frequência é inversamente proporcional à indutância mútua. O transistor faz com que se tenham altas frequências devido a sua alta velocidade de chaveamento do circuito, além disso, ele é responsável pelas harmônicas geradas nas ondas por ser uma carga não linear (descontinuidades na corrente devido ao chaveamento), podendo ser adicionado um filtro para tornar as ondas mais senoidais.

Apenas um dos testes realizados (bobina emissora não sobreposta com diâmetro 6,6 cm e 30 espiras e bobinas receptora com diâmetro de 6,6 cm e 40 espiras) obteve-se uma senoide quase perfeita, isso ocorreu devido ao alinhamento quase perfeito das linhas de campo.

Para trabalhos futuros, serão estudados tipos de filtros para amenizar as harmônicas nas ondas causadas pelo transistor, além disso, serão estudados meios para aumentar o fluxo magnético entre as bobinas, melhorando assim o campo induzido e conseqüentemente sua corrente no receptor, a fim de desenvolver um protótipo de carregamento de celular via WPT.

## REFERÊNCIAS

ABREU, Reinaldo Lima de. **Projeto e Desenvolvimento de Dispositivo para Transmissão de Energia Elétrica sem Fios por Modos Ressonantes**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/990>> Acesso em: 24 ago. 2018.

ADEEB, Mohammad Ahsanul. **A Class-E Inductive Powering Link and Backward Data Communications for Implantable Sensor Systems**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências com Ênfase em Engenharia Elétrica) – Universidade do Tennessee, Knoxville, 2006. Disponível em: <[https://trace.tennessee.edu/utk\\_gradthes/1489/](https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/1489/)>. Acesso em 2 set. 2018.

BATTAGLIN, Paulo David et al. **Contribuições sobre a gênese da Engenharia elétrica**. 2010. 129 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP. Disponível em: <[repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/259122](http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/259122)>. Acesso em 18 set. 2018.

CARLSON, W. Bernard. Harnessing the earth: Nikola tesla and the idea of broadcasting electric power, 1890–1905. In: 2007 IEEE **Conference on the History of Electric Power**. IEEE, 2007. p. 10-47 Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4510256>>. Acesso em: 11 mar. 2019.

HEETDERKS, William J. RF powering of millimeter-and submillimeter-sized neural prosthetic implants. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, v. 35, n. 5, p. 323-327, 1988. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1388>> Acesso em: 26 mar. 2019. (pag 326).

HELERBROCK, Rafael. **Transistor**; Brasil Escola. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/fisica/transistor.htm>>. Acesso em: 12 de set. 2019.

JORGETTO, Marcus Felipe Calori et al. **Transmissão indutiva de energia eletromagnética sem fios, para aplicações em postos de abastecimento de veículos elétricos puros: modelação para o elemento eletromagnético**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2015. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/dissertacao-marcus-felipe-calori-jorgetto.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2018.

KARALIS, Aristeidis; JOANNOPOULOS, John D.; SOLJAČIĆ, Marin. **Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer**. Annals of physics, v. 323, n. 1, p. 34-48, 2008.

KUROKAWA, Sérgio. **Análise de Circuitos alimentados por fontes constantes**. 2013. Universidade Estadual Paulista.

RIBEIRO, Ayslan Cristiano; SANTOS, Eduardo Sidnei. **Estudo da transferência de energia por acoplamento eletromagnético por circuitos ressonantes utilizando amplificador classe E**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2016. Disponível em: < [repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10099/1/CT\\_COELE\\_2016\\_1\\_22.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10099/1/CT_COELE_2016_1_22.pdf)>. Acesso em: 1 Dez. 2018.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**; tradução: Jorge Amoretti Lisboa, Liane Ludwig Loder. 3. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SAGIORATO, Évelyn dos Santos. **Carregador Wireless de baixa potência**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Elétrica. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2017. Disponível em: < [repositorio.upf.br/handle/riupf/1399](http://repositorio.upf.br/handle/riupf/1399)>. Acesso em 16 Nov. 2018.

SILVA, Marcio Antonio Pimenta da et al. **Otimização de enlace indutivo ressonante com três bobinas para transmissão de energia sem fio**. 2017. Dissertação (Mestrado em Energia Elétrica e Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: < [repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2572](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2572)>. Acesso em: 20 Out. 2018.

TESLA, Nikola. **Apparatus for transmitting electrical energy**. U.S. Patent n. 1,119,732, 1 dez. 1914.

TESLA, Nikola. **Minhas Invenções: A autobiografia de Nikola Tesla**. São Paulo: Unesp, p. 71-72, 2012.

VAN SCHUYLENBERGH, Koenraad; PUERS, Robert. **Self-tuning inductive powering for implantable telemetric monitoring systems. Sensors and Actuators A: Physical**, v. 52, n. 1-3, p. 1-7, 1996.

ZHU, Bin et al. Review of magnetic coupling resonance wireless energy transmission. **International Journal of U- & E-Service, Science & Technology**, v. 8, n. 3, 2015. Disponível em: < <https://pdfs.semanticscholar.org/e5da/d0a63e2c650f6b7783434e716c06076c8f02.pdf>>. Acesso em: 25 Set. 2018.