

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RICARDO MARCELINO DE AGUIAR**

**ESTUDO DE UM SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA  
UTILIZANDO CIRCUITO RESSONANTE PARA DISPOSITIVOS  
MÓVEIS**

**FLORIANÓPOLIS, 2022.**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RICARDO MARCELINO DE AGUIAR**

**ESTUDO DE UM SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA  
UTILIZANDO CIRCUITO RESSONANTE PARA DISPOSITIVOS  
MÓVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido  
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia de Santa Catarina como parte  
dos requisitos para obtenção do título de  
Engenheiro Eletricista.

Orientador:  
Prof. Ricardo Luiz Alves, Dr. Eng

**FLORIANÓPOLIS, 2022.**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Aguiar, Ricardo Marcelino de  
ESTUDO DE UM SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA UTILIZANDO  
CIRCUITO RESSONANTE PARA DISPOSITIVOS MÓVEIS / Ricardo  
Marcelino de Aguiar; orientação de Ricardo Luiz  
Alves. - Florianópolis, SC, 2022.

54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal  
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado  
em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico  
de Eletrotécnica.  
Inclui Referências.

1. Transmissão de energia sem fio. 2. Acoplamento  
indutivo ressonante. 3. Protótipo. I. Alves, Ricardo  
Luiz . II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. ESTUDO  
DE UM SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA UTILIZANDO  
CIRCUITO RESSONANTE PARA DISPOSITIVOS MÓVEIS .

# ESTUDO DE UM SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA UTILIZANDO CIRCUITO RESSONANTE PARA DISPOSITIVOS MÓVEIS

RICARDO MARCELINO DE AGUIAR

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 18 de março, 2022.

Banca Examinadora:



Assinado de forma digital  
por RICARDO LUIZ  
ALVES:02268675955  
Dados: 2022.03.31  
13:47:20 -03'00'

---

Ricardo Luiz Alves, Dr Eng.



Documento assinado digitalmente  
JAMES SILVEIRA  
Data: 01/04/2022 15:33:42-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

James Silveira, Dr Eng.



Documento assinado digitalmente  
MAIKEL FERNANDO MENKE  
Data: 31/03/2022 20:58:09-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Maikel Fernando Menke, Dr Eng.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que enxergam o conhecimento como  
elemento transformador do mundo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha esposa Mayara, por estar sempre do meu lado me incentivando e acreditando no meu potencial. Ao Professor Dr. Ricardo Luiz Alves, que se mostrou muito atencioso e dedicado na elaboração desse TCC, dando suporte inclusive fora dos horários de trabalho e finais de semana. Agradeço também aos demais colegas de trabalho que de alguma forma me ajudaram na elaboração desse trabalho de conclusão de curso.

## RESUMO

Neste trabalho é realizada uma pesquisa teórica para a elaboração de um protótipo eletrônico visando o carregamento sem fio de uma carga resistiva genérica. É aplicada a topologia do método de acoplamento indutivo ressonante de curta distância para possíveis futuras aplicações em dispositivos móveis. Primeiramente é apresentado um arcabouço teórico caracterizando a transmissão de energia em curtas distâncias conhecida como *Near-field*, onde a modelagem é possível através das Equações de Maxwell. Consequentemente são apresentados os dados dos cálculos dos parâmetros do projeto para serem aplicados em uma simulação virtual. Por fim é feita a construção do protótipo sendo possível a coleta de dados para que o mesmo seja validado. O protótipo se mostrou adequado aos parâmetros de projeto fornecendo uma potência de 5 W para a carga, onde o objetivo principal é o carregamento de uma célula de Íons de Lítio com a finalidade de fornecer energia ao dispositivo móvel.

**Palavras-chave:** Transmissão de energia sem fio. Acoplamento indutivo ressonante. Protótipo.

## **ABSTRACT**

In this work, a theoretical research is carried out for the elaboration of an electronic prototype aiming the wireless charging of a generic resistive load. The short distance inductive resonant coupling method topology is applied for possible future applications in mobile devices. First, a theoretical framework characterizing the transmission of energy over short distances known as Near-field is presented, where modeling is possible through Maxwell's Equations. Consequently, data from the calculations of the design parameters are presented to be applied in a virtual simulation. Finally, the construction of the prototype is made, being possible to collect data so that it can be validated. The prototype proved to be suitable for the design parameters providing a power of 5 W for the load, where the main objective is to charge a Li-Ion cell in order to supply energy to the mobile device.

**Keywords:** Wireless power transmission. Resonant inductive coupling. Prototype.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Tecnologias de transmissão de energia sem fio .....            | 16 |
| Figura 2 – Diagrama de blocos acoplamento indutivo.....                   | 17 |
| Figura 3 – Modelo de acoplamento indutivo.....                            | 19 |
| Figura 4 – Diagrama de blocos acoplamento indutivo ressonante .....       | 20 |
| Figura 5 – Tipos de topologias de acoplamento indutivos ressonantes ..... | 21 |
| Figura 6 – Topologia do circuito integrado IR2153.....                    | 24 |
| Figura 7 – Frequência IR2153.....                                         | 25 |
| Figura 8 – Diagrama funcional de bloco para IR2153 .....                  | 26 |
| Figura 9 – Indutor com núcleo de ar.....                                  | 26 |
| Figura 10 – Circuito retificador .....                                    | 27 |
| Figura 11 – Esquemático do projeto.....                                   | 28 |
| Figura 12 – Bobina plana .....                                            | 29 |
| Figura 13 – Bobina plana utilizada no protótipo .....                     | 30 |
| Figura 14 – Simulador de bobinas planas .....                             | 31 |
| Figura 15 – Construção das bobinas planas .....                           | 32 |
| Figura 16 – Tensão eficaz nas bobinas.....                                | 33 |
| Figura 17 – Modelo T do protótipo .....                                   | 35 |
| Figura 18 – Simulação do acoplamento indutivo no MULTISIM.....            | 35 |
| Figura 19 – Simulação do acoplamento indutivo no MULTISIM com carga ..... | 36 |
| Figura 20 – Ponte retificadora .....                                      | 37 |
| Figura 21 – Forma de onda na saída do retificador.....                    | 37 |
| Figura 22 – Esquemático de retificação e filtro.....                      | 38 |
| Figura 23 – Tensão de ripple na carga.....                                | 38 |
| Figura 24 – Configuração típica do LM7805.....                            | 40 |
| Figura 25 – Curva de carga da célula NCR185650EF .....                    | 41 |
| Figura 26 – Módulo carregador de bateria TP4056.....                      | 42 |
| Figura 27 – Topologia TP4056 .....                                        | 42 |
| Figura 28 – Protótipo utilizado nos testes de laboratório.....            | 43 |
| Figura 29 – Tensão no secundário sem carga .....                          | 44 |
| Figura 30 – Tensão no gate do mosfet sem carga .....                      | 46 |
| Figura 31 – Tensão no primário sem carga.....                             | 46 |
| Figura 32 – Tensão na saída do estágio de potência sem carga .....        | 47 |
| Figura 33 – Tensão no primário e secundário sem carga .....               | 47 |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 34 – Tensão no gate do mosfet com carga .....                            | 48 |
| Figura 35 – Tensão no primário e secundário com carga .....                     | 48 |
| Figura 36 – Tensão na saída do estágio de potência e secundário com carga ..... | 49 |
| Figura 37 – Tensão na carga .....                                               | 50 |
| Figura 38 – Corrente de entrada no protótipo .....                              | 50 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Valores de indutância calculados e medidos das bobinas ..... | 32 |
| Tabela 2 – Valores de tensão calculados e medidos das bobinas .....     | 33 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CT – Capacitor de Trabalho (define em conjunto com RT a frequência de trabalho)

ID – corrente de *dreno*

*IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor*

IR – International Rectifier

MOSFET – *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

Rds – Resistencia entre *dreno* e *source*

RT – Resistor de Trabalho (define em conjunto com CT a frequência de trabalho)

VCC – Tensão em corrente contínua.

Vds – Tensão entre *dreno* e *source*

WPT - *Wireless Power Transfer*

## SUMÁRIO

|            |                                                      |           |
|------------|------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                              | <b>12</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Justificativa .....</b>                           | <b>12</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Definição do Problema .....</b>                   | <b>13</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Objetivo Geral.....</b>                           | <b>14</b> |
| <b>1.4</b> | <b>Objetivos Específicos.....</b>                    | <b>14</b> |
| <b>1.5</b> | <b>Estrutura do trabalho.....</b>                    | <b>14</b> |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                   | <b>15</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Transmissão sem fio .....</b>                     | <b>15</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Indução eletromagnética .....</b>                 | <b>16</b> |
| 2.2.1      | Acoplamento indutivo .....                           | 17        |
| 2.2.2      | Modelo do acoplamento indutivo.....                  | 19        |
| 2.2.3      | Acoplamento indutivo ressonante .....                | 19        |
| <b>3</b>   | <b>DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA .....</b>                | <b>23</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Topologia do projeto.....</b>                     | <b>23</b> |
| 3.1.1      | Fonte .....                                          | 23        |
| 3.1.2      | Bobinas .....                                        | 26        |
| 3.1.3      | Retificador .....                                    | 27        |
| 3.1.4      | Carga .....                                          | 27        |
| <b>3.2</b> | <b>Projeto.....</b>                                  | <b>28</b> |
| 3.2.1      | Dimensionamento e construção das bobinas.....        | 28        |
| 3.2.2      | Frequência de ressonância .....                      | 32        |
| 3.2.3      | Circuito de retificação.....                         | 36        |
| 3.2.4      | Circuito de filtro .....                             | 37        |
| 3.2.5      | Regulador.....                                       | 40        |
| 3.2.6      | Circuito de carga .....                              | 41        |
| <b>3.3</b> | <b>Montagem do circuito na placa universal .....</b> | <b>43</b> |
| <b>4</b>   | <b>TESTES DE BANCADA .....</b>                       | <b>44</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Aquisição de medidas sem carga.....</b>           | <b>45</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Aquisição de medidas com carga .....</b>          | <b>47</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Teste de carga .....</b>                          | <b>49</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÃO .....</b>                               | <b>52</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                             | <b>53</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho visa realizar um estudo sobre as tecnologias existentes no campo da transmissão de energia *wireless* para elaboração do projeto experimental de um carregador sem fio. É importante conhecer as relações existentes entre os parâmetros de projeto como por exemplo a alteração da frequência ou indutância das bobinas, pois influenciam diretamente na transmissão de energia por indução magnética.

O uso da tecnologia de transmissão de energia sem fio (WPT – *Wireless Power Transfer*) é de grande ajuda em aplicações onde o uso dos fios ocupa espaço em demasia, é considerado inconveniente, ou é impraticável. A WPT pode ser encontrada atualmente aplicada em diversos campos, incluindo sistemas aeroespaciais, máquinas elétricas, dispositivos médicos implantáveis, entre outros (Zhu *et al.*, 2015).

A contextualização dos métodos de transmissão de curta distância, chamados de *near-field*, é primeiramente apresentada, traçando os limites teóricos de aplicação destes com base nos conceitos derivados das Equações de Maxwell para campos eletromagnéticos. Uma das formas é acoplamento indutivo ressonante nos permite a entrega de energia de um emissor para um receptor, porém nesse caminho existem perdas de energia e singularidades físicas intrínsecas dos componentes que se pretende minimizar ao verificar as condições teóricas e práticas de trabalho ideal do dispositivo para um funcionamento adequado.

### 1.1 Justificativa

Atualmente há um crescimento no uso dos dispositivos móveis, uma vez que podem concentrar uma série de funções em um único dispositivo, economizando espaço e garantindo boa performance com seus processadores robustos e velozes. Boa parte da praticidade que está relacionada a esses dispositivos, provem do advento da comunicação sem fio, que liberta o usuário para transitar livremente sem a conexão física com um cabo.

Lemos (2007) reconhece que as tecnologias sem fio transformaram as relações existentes entre pessoas e os espaços urbanos e criaram novas formas de

mobilidade. Porém ainda assim, existe um momento quase que diário, relativo ao carregamento da bateria do dispositivo, que na maior parte das vezes é utilizado um carregador a cabo. Uma forma para aumentar a praticidade nesses dispositivos seria a possibilidade de uma alimentação por indução, pois não utiliza uma conexão física entre o dispositivo, permitindo ser acoplada em qualquer lugar, por exemplo na mesa de um escritório ou até mesmo em uma case de um *smart fone*. O transmissor de energia por indução vem nesse intuito, proporcionando uma conexão entre emissor e receptor a fim de eliminar a existência de um cabo físico. As praticidades e aplicabilidades são inúmeras, que vão desde uma transmissão de rádio a um carregador de celular ou carro elétrico.

Segundo Jacobs (2010), essa tecnologia proporciona muitas vantagens, principalmente quando é aplicada em aparelhos eletrônicos que necessitam de maior mobilidade, como smartphones e nos aparelhos chamados de *gadgets* (dispositivos eletrônicos portáteis) – fones de ouvido, relógios inteligentes, caixas de som portáteis etc.

Logo o desenvolvimento nessa área possui uma grande parcela na contribuição de novas tecnologias que estão em vigência para um benefício social.

## **1.2 Definição do Problema**

Um fato interessante é que na transmissão de energia sem fio a frequência bem como as características dos elementos armazenadores de energia (Indutores e capacitores) estão relacionadas diretamente com a capacidade de energia que pode ser transmitida.

De que forma elaborar um circuito eletrônico confiável com o dimensionamento adequado para todos os componentes?

É importante o desenvolvimento de um protótipo fundamentado na teoria, combinado a simulações e testes de laboratório. Logo os estudos do comportamento dessas variáveis são de fundamental importância para a elaboração de um dispositivo de transmissão de energia adequado para uma determinada carga.

### **1.3 Objetivo Geral**

O objetivo desse trabalho é elaborar um circuito eletrônico experimental caracterizado por um carregador sem fio. A finalidade é fornecer energia a uma carga resistiva (dispositivo móvel) através de um protótipo que possui um acoplamento indutivo ressonante.

### **1.4 Objetivos Específicos**

Este trabalho tem como objetivo específico.

- a) estudar os métodos existentes para a transmissão de energia sem fios, bem como suas aplicações;
- b) sistematizar e modelar um sistema de carregamento sem fio de baterias típicas de dispositivos eletroeletrônicos;
- c) construir um protótipo com base no modelo proposto;
- d) comparar o modelo teórico com os resultados práticos.

### **1.5 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está dividido em quatro capítulos. No primeiro capítulo é contextualizada a tecnologia de transmissão de energia sem fio em diversos equipamentos usuais da atualidade com suas características. No segundo capítulo é realizado um estudo mais detalhado nas topologias envolvendo o princípio indutivo ressonante. Em sequência é sugerido uma topologia de um circuito de carregador sem fio com algumas restrições de projeto e especificações definidas anteriormente. Por último a validação dos parâmetros por meio dos levantamentos de dados laboratoriais de bancada e por simulações virtuais visando concatenar com os dados calculados.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Nikola Tesla foi o primeiro a mencionar a transmissão de energia sem fio há mais de 100 anos. Os avanços na área de transmissão de energia sem fio só se tornaram expressivos novamente no ano de 1990, quando a Auckland University propôs vários sistemas para carregamento de veículos elétricos por indução (COVIC, 2013).

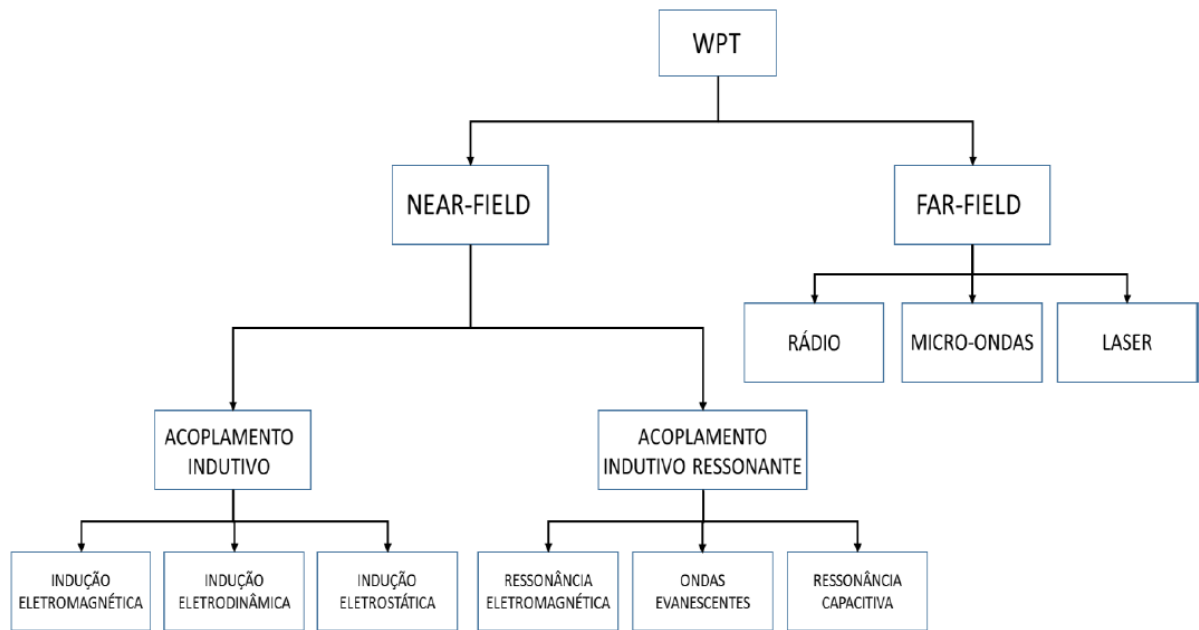
### 2.1 Transmissão sem fio

A topologia de transmissão de energia abordada neste trabalho será baseada na tecnologia *near-field* apresentados na Figura 1 que tem sua característica principal a proximidade dos campos magnéticos. A transmissão da energia é realizada pela indução de campos magnéticos variáveis no tempo. Esses fenômenos são estudados na física e modelados pelas equações de Maxwell.

Uma outra topologia de transmissão de energia que não será abordada nesse trabalho conhecida como *far-field* onde a irradiação das ondas eletromagnéticas é o meio principal na condução de energia, permitindo assim atingir maiores distâncias se comparado a *near-field*.

As ondas eletromagnéticas englobam rádios e satélites para GPS (*Global Positioning System*) e radares. Sua principal aplicabilidade é em aparelhos que utilizam o princípio do aquecimento dielétrico, que é o caso do forno de micro-ondas, por exemplo (CASTRO, FIALHO, CAVALHIERE, COELHO JUNIOR, LOPES, 2021).

**Figura 1 – Tecnologias de transmissão de energia sem fio**



Fonte: Castro (2021).

## 2.2 Indução eletromagnética

A lei de Faraday-Lenz apresentada na Equação 1, modela o surgimento de tensão elétrica através de um campo magnético induzido. Isso ocorre devido a força eletromotriz (Fem) produzida pelo movimento relativo entre condutor e campo magnético variante no tempo. “Um condutor retilíneo se desloca em um campo magnético de forma a cruzar linhas de campo, uma tensão é induzida através do condutor, quanto maior as linhas de campo cruzadas por unidade de tempo, ou quanto maior a força do campo magnético maior a tensão induzida através do condutor” (BOYLESTAD, 2004).

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

Onde:

Fem - Força eletromotriz (V);

t – tempo (s);

Φ - Fluxo magnético (Wb).

Desse estudo, James Clerk Maxwell escreveu equações notórias que são aplicadas nos transformadores elétricos, geradores, motores e máquinas de indução em geral, a equação desenvolvida consiste em:

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

Onde:

$\nabla$  - operador gradiente;

E - campo elétrico (V/m);

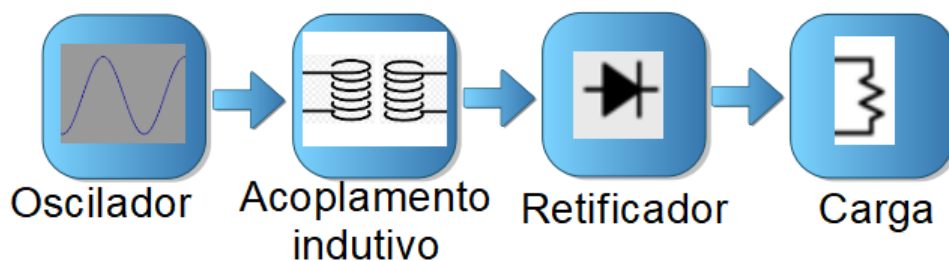
B - campo magnético (A/m).

### 2.2.1 Acoplamento indutivo

O acoplamento indutivo, é baseado em um campo magnético induzido que transfere energia elétrica entre duas bobinas. Essa técnica faz uso direto da Lei de Faraday-Lenz da indução que diz que um campo magnético variável induz uma corrente sobre uma espira inserida neste campo. Os transformadores são um exemplo clássico desse fenômeno.

A Figura 2 ilustra esse fenômeno, em que uma fonte de energia faz circular uma corrente alternada sobre uma bobina transmissora L1 que por consequência da indutância mútua, induz tensão/corrente na bobina receptora L2 que, após uma etapa de retificação, alimenta uma carga.

**Figura 2 – Diagrama de blocos acoplamento indutivo**



Fonte: Elaboração própria (2021).

É importante perceber com base na Equação (3) que a potência transferida bem como sua eficiência são proporcionais ao quadrado do coeficiente de acoplamento K.

$$k = M/\sqrt{L_1 L_2} \quad (3)$$

Onde:

k – coeficiente de acoplamento;

M – Indutância mútua (H);

L – Indutância das bobinas (H);

Esse fato justifica a presença de um oscilador que junto com a fonte de alimentação tem a função de produzir correntes de alta frequência (MYUNGHYORYU, 2005).

Como a eficiência de transmissão diminui com o aumento da distância entre as bobinas devido a dispersão das linhas de fluxo magnético, isso acarreta na restrição desse método tendo aplicações somente a distâncias curtas.

Segundo MyunghyoRyu (2005) é notório nos transformadores ideais com núcleo ferro magnético que o coeficiente de acoplamento K é igual a 1, isso permite o máximo de eficiência na transferência de energia, porém considerando que as bobinas possuem um núcleo de ar o coeficiente de acoplamento cai, pois há dispersão das linhas de fluxo magnético para o meio.

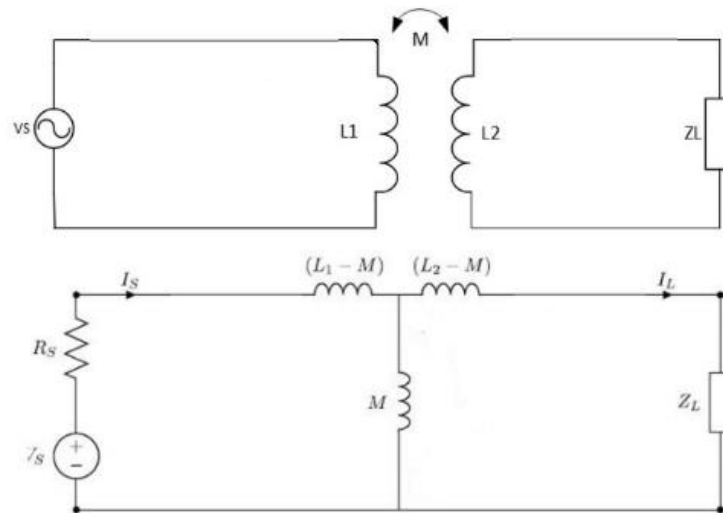
Para minimizar esse efeito é necessário acoplar as bobinas o mais próximo possível, aumentando assim sua eficiência na transferência de energia. Uma forma usual de maximizar a eficiência desse acoplamento é aumentar o diâmetro das bobinas ou utilizar bobinas planares. Isso não se aplica em pequenos dispositivos móveis, pois o espaço para alocar o acoplamento indutivo é considerado crítico.

Uma forma de contornar o problema da baixa eficiência nos acoplamentos indutivos com núcleo de ar é utilizá-lo combinado as técnicas de ressonância.

### 2.2.2 Modelo do acoplamento indutivo

Um acoplamento indutivo sem ressonância, pode ser modelado através do modelo conhecido como T, que basicamente combina a magnitude da indutância mútua aos valores dos pares de bobinas primária e secundária. Esse modelo nos possibilita ter uma visão mais compacta do circuito facilitando sua interação nas plataformas de simulações, pode-se observá-lo na Figura 3.

**Figura 3 – Modelo de acoplamento indutivo**



Fonte: adaptado pelo autor (2022).

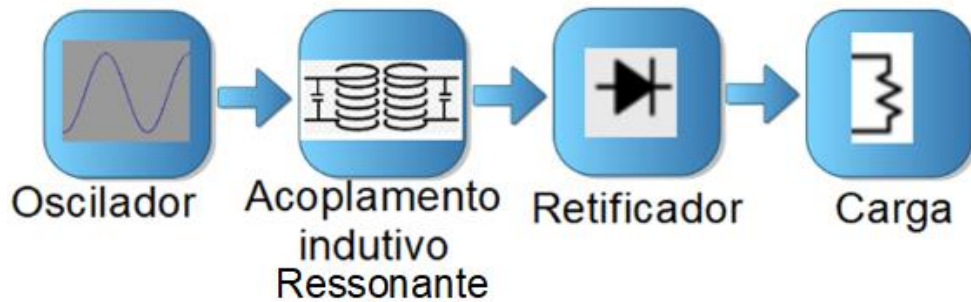
### 2.2.3 Acoplamento indutivo ressonante

Acoplamento indutivo ressonante é uma forma otimizada do acoplamento indutivo que tem como característica principal o efeito da ressonância aplicado ao campo magnético induzido entre dois circuitos modelado pela Lei Faraday-Lenz.

De acordo com Kesler (2017), a ressonância é um fenômeno que, geralmente, envolve a oscilação de energia entre duas etapas. O exemplo mais comum é o balanço de um pêndulo, onde a energia oscila entre a potencial e a cinética. Um sistema que se encontra em ressonância obtém um grande acúmulo de

energia armazenada e pouca excitação. O acúmulo ocorre devido a taxa de injeção de energia no sistema ser maior que a taxa de perda de energia pelo sistema.

**Figura 4 – Diagrama de blocos acoplamento indutivo ressonante**



Fonte: Elaboração própria (2022).

Esse método consiste em adicionar capacitores que se relacionam com as bobinas de transmissão que operam em alta frequência, a ressonância ajuda a conceber um acoplamento superior ao acoplamento indutivo Figura 4.

Segundo Wheeler (1943), os primeiros trabalhos relacionando acoplamento indutivo foram realizados por Tesla, em seus primeiros experimentos com WPT verificando a melhora da transferência de energia ao adicionar um capacitor ao acoplamento indutivo.

De acordo com Wheeler (1943), quando a oscilação ocorre em sua frequência de ressonância natural ( $\omega_0$ ), os ressonadores mutuamente acoplados transferem entre si a máxima potência e cada ressonador apresenta sua taxa de perda intrínseca ( $\Gamma$ ), que é a taxa com que o sistema perde energia armazenada.

O fator de qualidade ( $Q$ ) é a relação entre esses dois parâmetros. A análise desse fator permite a quantificação da capacidade do sistema de armazenar energia e pode ser calculado pela equação abaixo.

$$Q = \frac{\omega_0}{2\Gamma} \quad (4)$$

Onde:

$Q$  – Fator de qualidade;

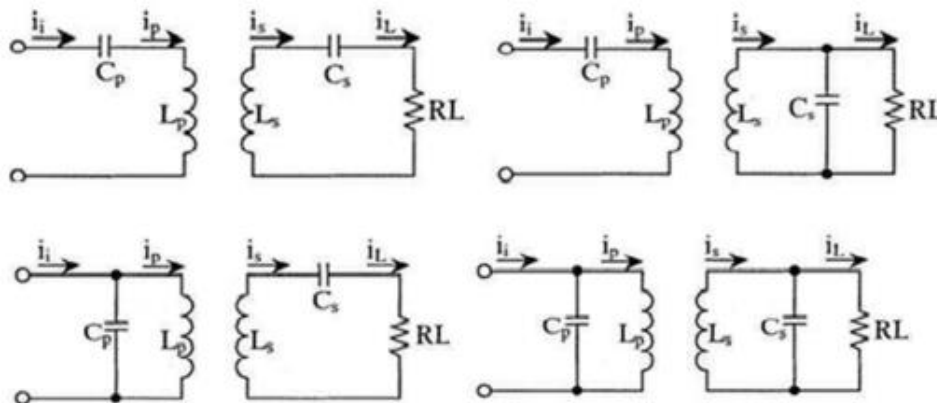
$\omega_0$  – frequência de ressonância natural (rad/s);

$\Gamma$  – taxa de perda.

Em 2007 foi realizado um experimento em uma tese de mestrado do MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts), onde foi possível demonstrar experimentalmente o funcionamento de uma lâmpada de 60W de potência, recebendo energia de uma fonte a 2m de distância com aproximadamente 45% de eficiência (KURS, 2007).

Ao acrescentar o capacitor as bobinas do transmissor podemos fazer ligações em série ou em paralelo desenvolvendo algumas topologias de acoplamento indutivo Figura 5.

**Figura 5 – Tipos de topologias de acoplamentos indutivos ressonantes**



Fonte: Adaptado de Kuzeya, Balcib e Altin (2017).

A disposição do capacitor em relação a bobina configura o tipo de circuito que pode ser classificado basicamente como circuito LC série ou LC Paralelo. A principal diferença entre o acoplamento LC série e LC Paralelo é o fluxo de corrente elétrica que passa por esses elementos na frequência de ressonância. Onde a frequência de ressonância em Hz é determinada em relação aos elementos reativos do circuito é:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \omega_0 = 2\pi f \quad (5)$$

Onde:

$f$  - Frequência (Hz);

L - Indutância (H);

C - Capacitância (F).

O acoplamento adotado no protótipo será o LC série, a fim de propiciar um maior fluxo de corrente elétrica na bobina do primário sintonizada na frequência de ressonância, sendo limitada somente pela resistência série da bobina e resistência série do capacitor.

### 3 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

Inicialmente realizou-se uma pesquisa buscando identificar as características mais importantes sobre a tecnologia WPT direcionada a dispositivos móveis, para servir de norteador teórico e prático na busca de uma fonte segura para desenvolver um protótipo de carregador sem fio. Um ponto importante é a escolha dos parâmetros do protótipo a ser elaborado, logo a pesquisa bibliográfica nos auxilia na justificativa da escolha dos valores de parâmetros do projeto.

De acordo com Gil (2008), uma pesquisa bibliográfica consiste no estudo de materiais previamente elaborados, principalmente livros e artigos científicos.

#### 3.1 Topologia do projeto

A topologia do projeto está representada pelo diagrama na Figura 4 onde cada etapa do projeto está associada ao seu respectivo bloco que elucida sua função no projeto. Vale ressaltar que esse diagrama constitui um sistema geral do método de acoplamento indutivo ressonante para uma carga genérica.

Cada etapa do diagrama de blocos será abordada em sua respectiva ordem.

##### 3.1.1 Fonte

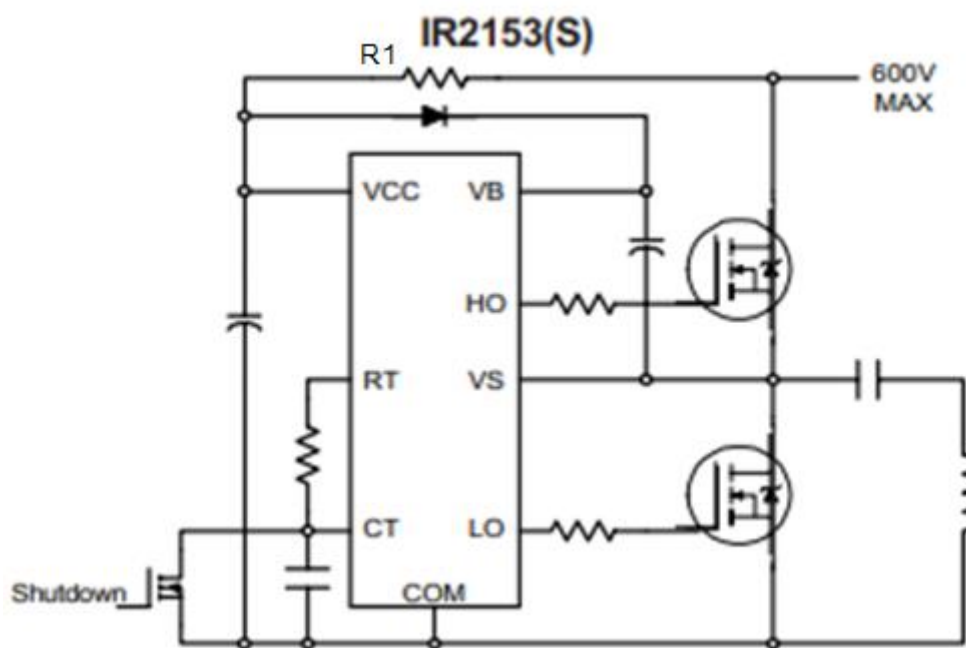
Formado por um circuito oscilador onde é gerado um sinal de baixa potência com uma frequência de trabalho pré-determinada.

O oscilador pode ser auto oscilante (geralmente formado por um transistor combinado com um capacitor). Outra forma de desenvolver um oscilador é utilizar um circuito integrado dedicado como o NE555 ou ainda empregar um microcontrolador como o Arduíno. Caso o nível de potência do sinal não seja atendido se faz necessário o uso de um amplificador de sinal (*drive*) no intuito de atender a corrente de excitação dos pares de bobinas.

O circuito escolhido para essa aplicação foi o IR2153 atualmente da empresa Infineon, se trata de um chip de 8 pinos dedicado para chaveamento em uma

grande faixa de frequência até 1Mhz, pois trabalha com uma tensão de *gate* adequada para ser utilizada em MOSFTs ou IGBTs, que são utilizados na parte do chaveamento da fonte de alimentação do acoplamento indutivo. Esse circuito integrado ainda apresenta uma configuração em meia ponte, que garante a desmagnetização dos pares de bobinas permitindo que o conjunto indutivo não sature. Também possui um oscilador interno que é ajustado pelos valores de RT e CT como mostrado na Figura 6.

**Figura 6 – Topologia do circuito integrado IR2153**

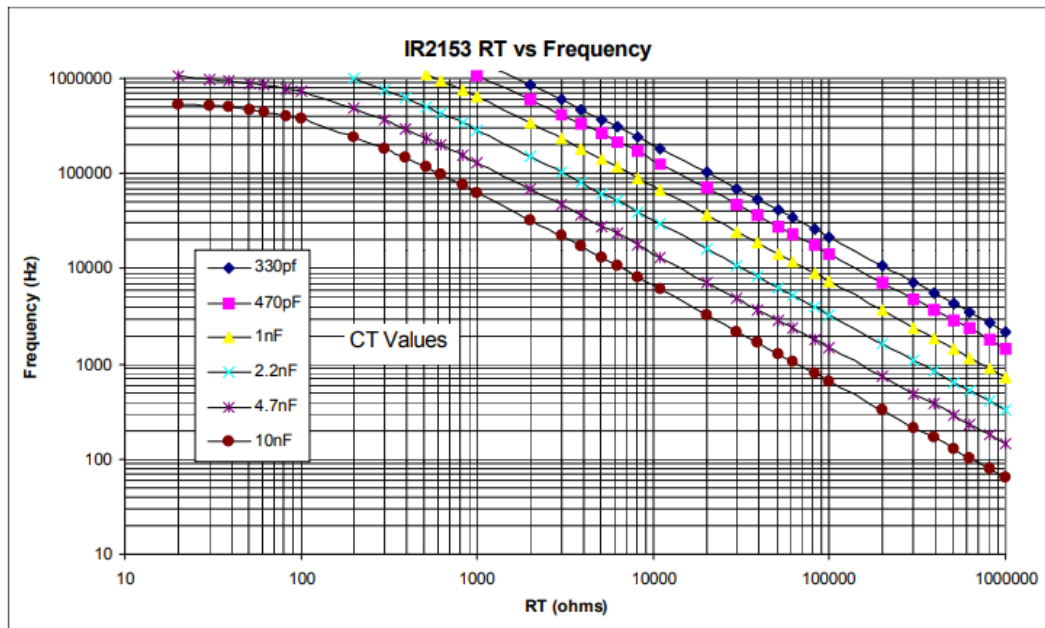


Fonte: Datasheet IR2153 (2022).

O IR2153 nos possibilita uma redução na quantidade de componentes periféricos se comparado a um oscilador clássico como o NE555.

A frequência de trabalho do oscilador é obtida mediante gráfico presente no datasheet do componente que relaciona os valores do capacitor (CT) e resistor (RT) com a frequência desejada como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Frequência IR2153

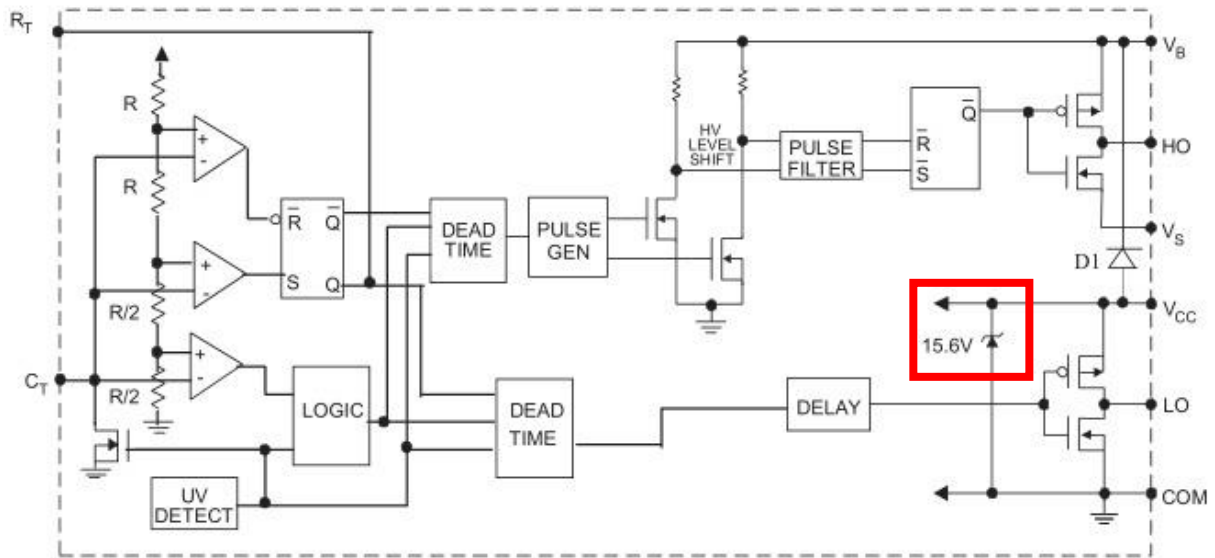


Fonte: Datasheet IR2153 (2022).

O dispositivo utilizado no chaveamento da carga foi o IRF640 MOSFET de canal N de alta potência que é indicado para aplicações em comutação, DC e áudio. Este componente já possui um diodo intrínseco interno e tem como características:  $V_{dss} = 200 \text{ V (Max)}$ ,  $I_d = 16 \text{ A (max)}$  e  $R_{ds(on)} < 0,18 \Omega$ .

O dimensionamento correto de R1 Figura 6 garante o bom funcionamento do circuito integrado IR2153. Esse componente possui em seu interior um diodo Zener que possibilita ao IR2153 uma tensão adequada de trabalho de 15,6 V conforme destacado na Figura 8. A tensão máxima de  $V_{cc}$  pode chegar até 600V, porém neste projeto utilizou-se uma tensão de 24 V fornecida por uma fonte externa. Para dimensionar o resistor limitador de corrente máxima do diodo Zener aplicamos diretamente a lei de Ohm. Pelo *datasheet* observa-se que a corrente máxima do diodo Zener é de 5 mA,  $V_{cc}$  de 24 V pela lei de Ohm obtemos uma resistência de 480  $\Omega$ .

**Figura 8 – Diagrama funcional de bloco para IR2153**



Fonte: Datasheet IR2153 adaptada pelo autor (2022).

### 3.1.2 Bobinas

Uma bobina (Figura 9), é formada basicamente por qualquer condutor elétrico isolado enrolado em si mesmo, ou ainda em volta de um núcleo (ar, ferro, outros materiais). Esse componente será construído de acordo com os parâmetros de projeto que determinará seu diâmetro e seção transversal do condutor. Ainda acoplado a esses componentes está o circuito ressonante (rede de capacitores). Importante enfatizar que é o principal bloco funcional responsável pelo processo de transmissão de energia.

**Figura 9 – Indutor com núcleo de ar**

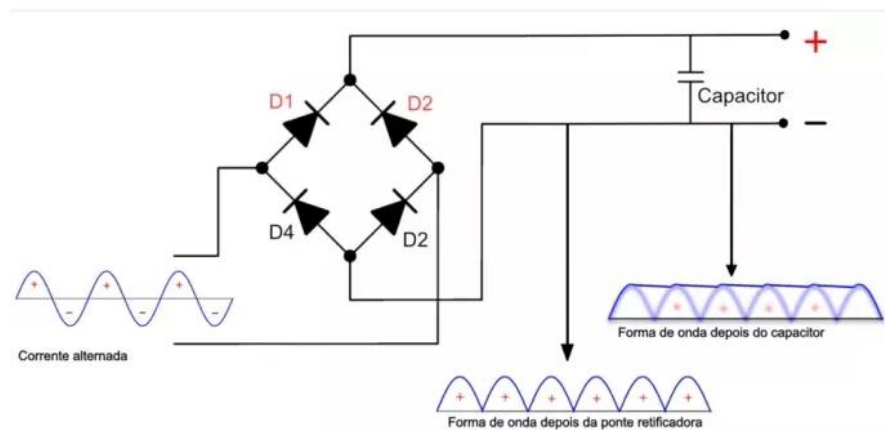


Fonte: Adaptada pelo autor (2022).

### 3.1.3 Retificador

É o circuito que antecede a carga, geralmente formado basicamente por uma ponte retificadora (disposição de diodos) combinada a um capacitor de filtro. Esse conjunto converte tensão e corrente alternada em tensão e corrente contínua com a finalidade de alimentar a carga, conforme Figura 10.

**Figura 10 – Circuito Retificador**



Fonte: retirado do site <https://www.mundodaeletrica.com.br> (2022).

### 3.1.4 Carga

A alimentação da carga é a principal finalidade desse projeto, logo é conveniente modelar a carga de um dispositivo genérico utilizando um resistor. A resistência é um mecanismo físico que converte a energia elétrica em calor.

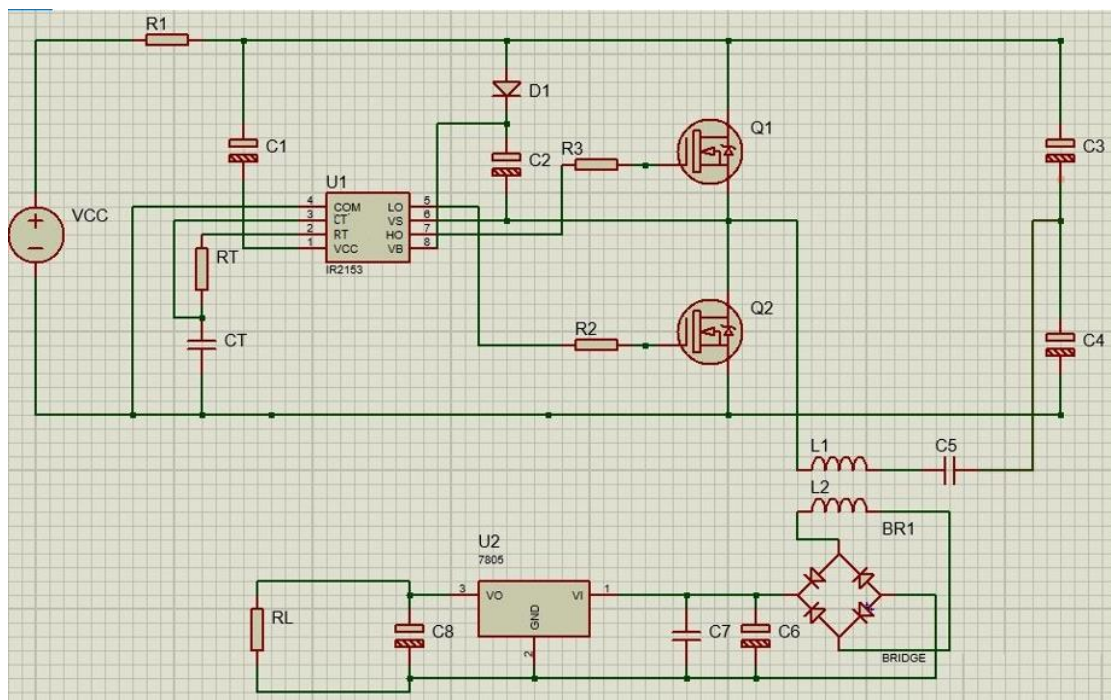
A carga mais comum dentro de um sistema elétrico é a carga resistiva, uma vez que todo equipamento, conta com uma resistência interna em seus circuitos eletrônicos. O dimensionamento da carga é feito pela aplicação direta da lei de Ohm, haja vista que a potência da carga é um parâmetro de projeto conhecido.

### 3.2 Projeto

Inicialmente um ponto crítico para a construção do protótipo são os valores atribuídos para alguns componentes como a indutância das bobinas por exemplo, pois a magnitude dos valores de indutância influencia toda a cadeia de dimensionamento do circuito. Outro ponto importante é a viabilidade de aquisição desses componentes, assim temos um compromisso de projeto entre valor monetário e disponibilidade desses componentes.

Com base na pesquisa e na viabilidade das aquisições dos componentes é contemplado no esquemático a seguir a topologia vislumbrada nos tópicos anteriores como mostra a Figura 11.

**Figura 11 – Esquemático do projeto**



Fonte: Próprio autor (2022).

#### 3.2.1 Dimensionamento e construção das bobinas

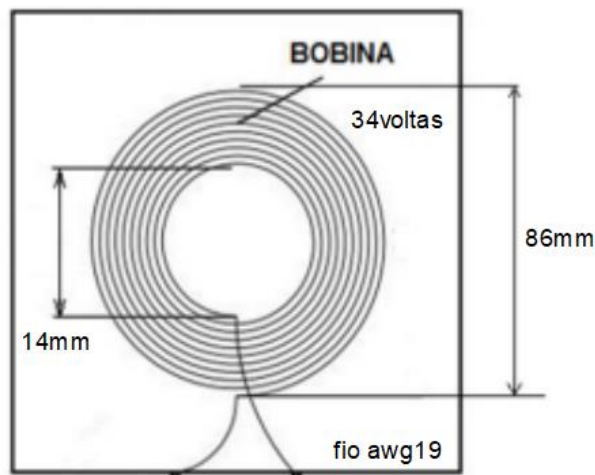
Os indutores são os primeiros componentes a serem construídos devido a sua complexidade em relação aos demais componentes. A escolha da potência da

carga é baseada na maioria dos dispositivos móveis como smartphone, que fornecem em média na saída do seu carregador uma tensão de 5 V por uma corrente de 1 A, ou seja, 5 W de potência na saída.

Partindo então do princípio que a bobina deve suprir uma carga 5 W, a carga exige pelo menos 5 V, então pela lei de Ohm encontramos uma corrente média de 1 A, contudo o fio adotado foi o AWG19 que possui corrente máxima de 1.8 A.

Optou-se pelas bobinas planares para efetuar a transmissão de energia, pois é amplamente utilizada em aplicações de acoplamento indutivo ressonante. Segundo Gondim (2010) este é o modelo de geometria ideal para ser utilizado nesse tipo de aplicação como mostra a Figura 12.

**Figura 12 – Bobina plana**



Fonte: Adaptado pelo autor (2022).

Cada bobina possui 34 voltas com diâmetro interno de 14mm de fio awg19, seu diâmetro externo chega a 86mm considerando um espaço entre voltas de 0,15mm, na Figura 13 pode-se observar como ficou o par de bobinas construído para ser usado no protótipo.

**Figura 13 – Bobina plana utilizada no protótipo**



Fonte: Elaboração própria (2021).

Com base nas dimensões físicas adotadas na construção das bobinas podemos calcular a indutância das mesmas.

Segundo (Sunderarajan S. Mohan, 1999) a indutância da bobina plana, pode ser calculada pela expressão simplificada dada pela Equação 6.

$$L = \frac{\left(\frac{D_{out}}{2}\right)^2 A^2}{(30A - 11D_{in})}, \quad A = \frac{D_{in} + N(w + s)}{2} \quad (6)$$

Onde:

Dout - Diâmetro externo (mm);

Din - Diâmetro interno (mm);

N - Número de voltas;

W - Diâmetro dos condutores (mm)

S - Espaçamento entre os condutores (mm);

L – Indutância das bobinas (uH).

Com a ajuda do simulador online da *energylabs* foi possível fazer uma breve estimativa dos possíveis valores de indutância das bobinas, como mostra a Figura 14, uma vez que existe um compromisso em dimensionar o link indutivo da melhor maneira possível, levando em conta a disponibilidade dos materiais e a realidade do nosso laboratório.

Partindo então de alguns valores iniciais, como diâmetro do condutor, quantidade de voltas, diâmetro interno e espaço entre voltas foi possível estimar o valor da indutância própria da bobina aplicando esses valores de parâmetros na equação 6.

$$L = 47,7548 \mu H$$

**Figura 14 – Simulador de bobinas planas**

| Bobina em Plana          |        |    |
|--------------------------|--------|----|
| Diâmetro Interno (Di):   | 14     | mm |
| Número de Voltas (N):    | 34     |    |
| Diâmetro do fio (W):     | 0.91   | mm |
| Espaço entre Voltas (S): | 0.15   | mm |
| Calcular                 |        |    |
| Diâmetro Externo (De):   | 86.08  | mm |
| Comprimento de Fio (C):  | 5.345  | m  |
| Indutância (L):          | 47.755 | uH |

Fonte: Retirado do site: <http://www.energylabs.com.br> (2022).

A construção da bobina foi inteiramente manual, utilizando uma ferramenta adaptada para favorecer o movimento circular do enrolamento do condutor, minimizando o efeito de memória do cobre em conjunto com a aplicação de cola instantânea para contribuir na fixação da alocação das voltas.

**Figura 15 – Construção das bobinas planas**



Fonte: Elaboração própria (2022).

Após a construção das bobinas planas como mostra a Figura 15, foi utilizado resina poliéster no seu encapsulamento, no intuito de preservar as propriedades mecânicas e favorecer a robustez do conjunto indutivo.

Para facilitar o desenvolvimento do protótipo foi adotado a mesma dimensão para ambas as bobinas primária e secundária, logo suas características intrínsecas e construtivas são muito próximas.

Os valores obtidos foram aferidos com o medidor ESR LCR-T4 e são relativamente próximos dos valores calculados, como relatado na Tabela 1, contudo torna-se possível calcular a frequência de trabalho do conjunto no caso a frequência de ressonância.

**Tabela 1 – Valores de indutância calculados e medidos das bobinas**

|                                           |        |
|-------------------------------------------|--------|
| Valor calculado (mH)                      | 0,0475 |
| Valor medido em laboratório Bobina 1 (mH) | 0,05   |
| Valor medido em laboratório Bobina 2 (mH) | 0,05   |

Fonte: Elaboração própria (2022).

### 3.2.2 Frequência de ressonância

Para determinar a frequência de ressonância do sistema primeiramente precisamos descobrir o coeficiente de acoplamento do conjunto de bobinas.

Para encontrar o coeficiente de acoplamento a partir dos dados medidos experimentalmente, utiliza-se a Equação 7 abaixo, que pode ser usada como uma aproximação do coeficiente de acoplamento utilizado nas simulações (MOTTA,2016).

$$k = \frac{V_2}{V_1} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (7)$$

Onde:

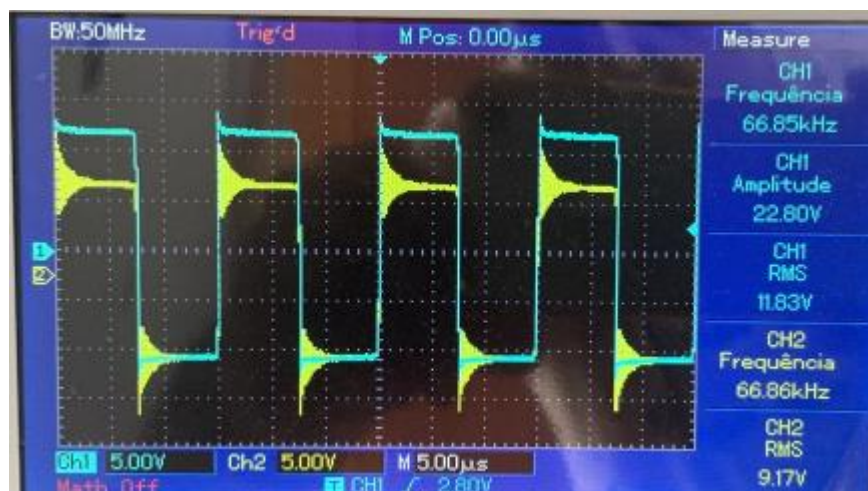
k – coeficiente de acoplamento;

V1 e V2 – Tensão na bobina primária e secundária (V);

L1 e L2 – Indutância própria das bobinas (H).

Abaixo segue as medidas obtidas experimentalmente no laboratório a uma frequência em torno 66khz com uma distância entre bobinas de aproximadamente 1 mm, essas medidas estão representadas na Figura 16 e Tabela 2.

**Figura 16 – Tensão eficaz nas bobinas**



Fonte: Elaboração própria (2022).

**Tabela 2 – Valores de tensão calculados e medidos das bobinas**

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| Tensão primário (Rms)   | 11,83 |
| Tensão secundário (Rms) | 9,17  |

Fonte: Elaboração própria (2022).

Agora é possível determinar o coeficiente de acoplamento entre a bobina do primário e secundário conforme Equação 7.

$$K = \frac{V_2}{V_1} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = 0,77$$

Deseja-se que circule o máximo de corrente possível pelo primário do circuito para garantir uma melhor transferência de potência entre o par indutivo, então é necessário adicionar um capacitor em série com o a bobina primária, no intuito de reduzir a componente reativa do indutor favorecendo assim o aumento da corrente no conjunto indutivo. Os únicos limitadores de corrente do circuito será a resistência série do capacitor, a resistência série da bobina e RDon dos transistores. Vale ressaltar que adicionando o capacitor em série com a bobina do primário, garantimos que não haverá corrente contínua circulando pela bobina.

O capacitor que deve compor o circuito ressonante precisa contribuir com uma frequência de trabalho acima de 20 kHz, pois desejamos que o dispositivo não forneça nenhum tipo de ruído ou som ao ambiente.

Utilizando a Equação 5, é possível determinar a frequência de ressonância para circuito LC série, uma vez adotado o valor do capacitor que compõem o tanque ressonante. Valor esse sugerido de 220nF.

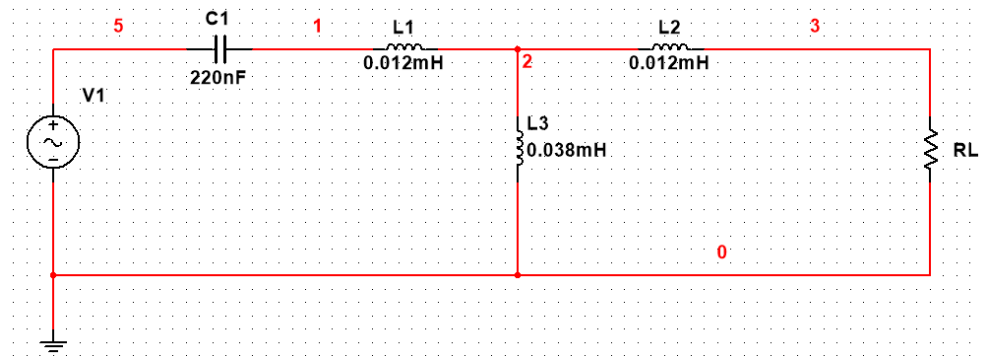
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL_1}} = 47,987 \text{ kHz}$$

É notório que a componente reativa vista pela corrente que passa pela bobina do primário enxerga uma combinação da indutância própria e da componente mútua entre as bobinas da Figura 3. Utilizando a constante de acoplamento K é possível encontrar a indutância mútua do circuito aplicando na Equação 3.

$$M = k\sqrt{L_1L_2} = 38,961 \mu H$$

Utilizando os valores calculados e de projeto, podemos construir o modelo T do par de bobinas acrescido do capacitor de compensação como mostra a Figura 17.

**Figura 17 – Modelo T do protótipo**

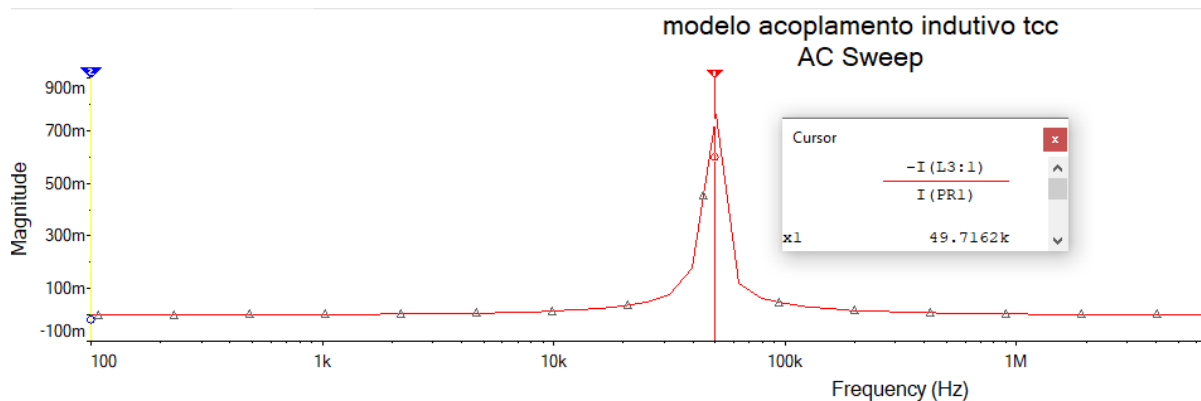


Fonte: Elaboração própria (2021).

Uma outra maneira para estimar a frequência de ressonância é simular o circuito em um software apropriado utilizando uma ferramenta chamada *sweep AC*. O software MULTISIM se mostrou muito útil nas simulações onde foi possível variar alguns parâmetros do circuito servindo assim como elemento norteador na escolha de alguns componentes, como por exemplo o capacitor de compensação.

Na Figura 18 temos a imagem da simulação onde podemos verificar a frequência de 49,7 kHz para uma corrente máxima no primário sem carga no secundário, valor esse muito próximo do valor calculado.

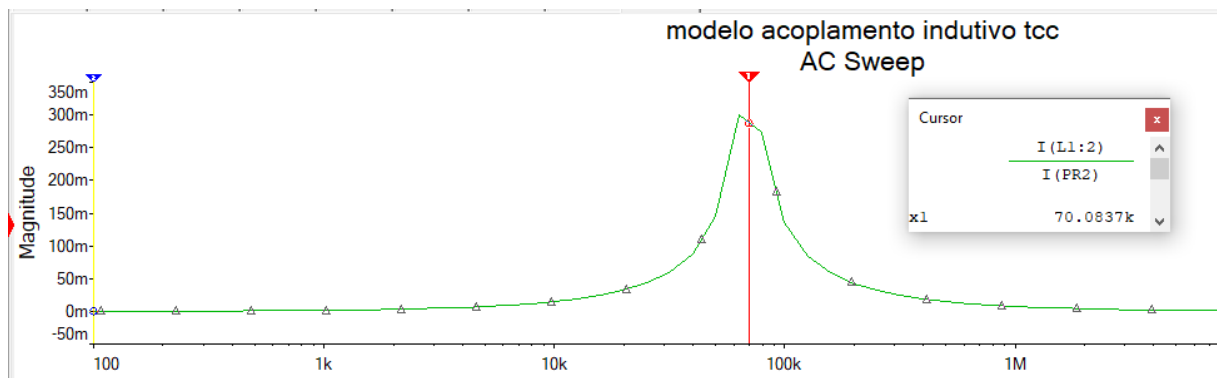
**Figura 18 – Simulação do acoplamento indutivo no MULTISIM**



Fonte: Elaboração própria (2022).

Na Figura 19 temos outra simulação realizada no modelo do circuito agora utilizando uma carga de 5 Ohms na saída.

**Figura 19 – Simulação do acoplamento indutivo no MULTISIM com carga**



Fonte: Elaboração própria (2022).

É perceptível um deslocamento no valor da frequência de ressonância, essa é a frequência do circuito como um todo e não somente a frequência de ressonância entre L1 e C1. Ela se aproxima de 70 kHz, na prática essa frequência pode ser determinada alterando a frequência de trabalho do conjunto e verificando a o comportamento da amplitude da corrente na bobina emissora.

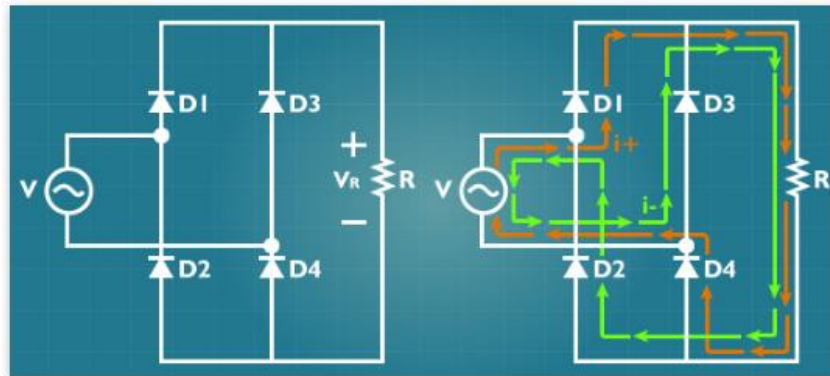
### 3.2.3 Circuito de Retificação

A topologia escolhida para a retificação é o circuito retificador de onda completa que aproveita também o ciclo negativo da tensão de entrada, convertendo essa tensão em tensão positiva para a carga.

Como pode-se observar na Figura 20, durante o ciclo positivo da tensão  $V$ , a corrente que circula pelo circuito retificador é a corrente  $i_+$ . Nessa situação, a tensão positiva polariza diretamente os diodos D1 e D4, enquanto que os diodos D2 e D3 estão cortados. Quando a tensão  $V$  está no seu semiciclo negativo, então os diodos D2 e D3 estão polarizados diretamente e os diodos D1 e D4 estão cortados. Isso faz com que circule no circuito a corrente  $i_-$ . Note que, em ambos os casos, a corrente sempre passa pela carga (resistor R) com o mesmo sentido, isso faz com que a tensão sempre tenha a mesma polaridade, sendo, dessa forma, sempre positiva.

A ponte retificadora escolhida para o projeto foi a RS203L que suporta uma corrente de máxima de 2A com tensão de ruptura próxima a 200V.

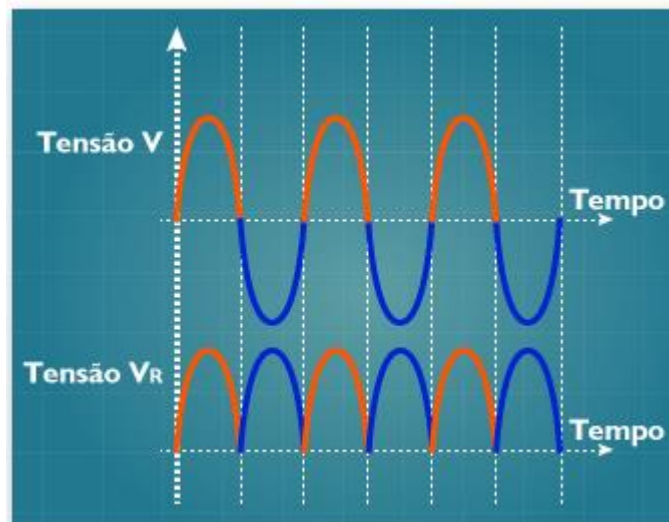
**Figura 20 – Ponte Retificadora**



Fonte: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/2/44/5/9> (2022).

A forma de onda na saída do circuito retificador é mostrada na Figura 21, a tensão  $V_R$  é sempre positiva e é aproveitado tanto o semiciclo positivo quanto o negativo da tensão de entrada.

**Figura 21 – Forma de onda na saída do retificador**



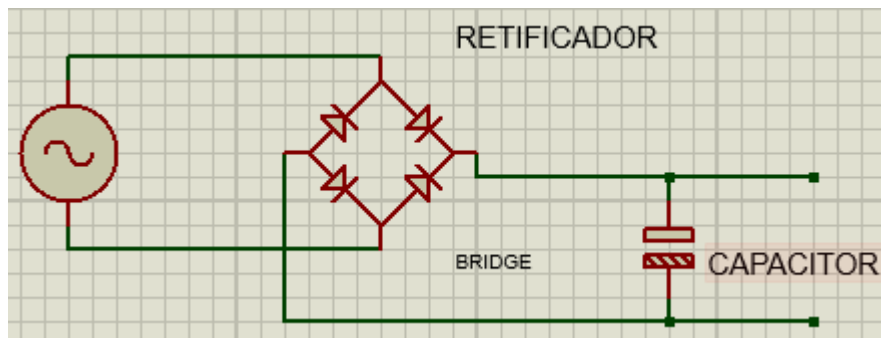
Fonte: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/2/44/5/9> (2022)

### 3.2.4 Circuito de Filtro

Na saída do sistema retificador temos corrente contínua pulsante, ela é formada pelos semiciclos de corrente alternada conduzidos pelos diodos. Como essa

corrente não é contínua pura, não é adequada para ser utilizada na maioria dos circuitos eletrônicos. Uma forma para filtrar essa componente pulsante é adicionar um capacitor ligado conforme a Figura 22.

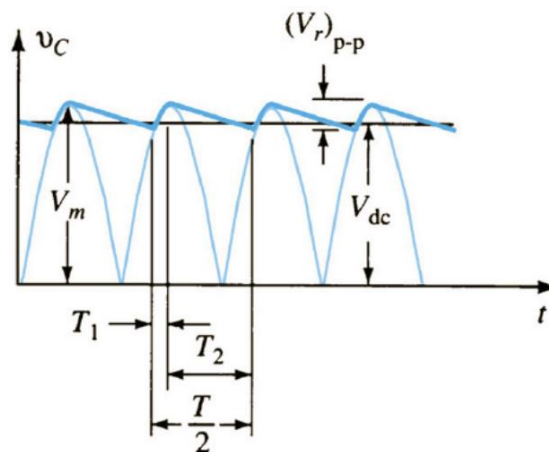
**Figura 22 – Esquemático de retificação e filtro**



Fonte: Elaboração própria (2022).

Quando o filtro estiver ligado a uma carga, assim como nos intervalos entre os semiciclos, quando a tensão no diodo "cai", e ele é mesmo polarizado no sentido inverso, o capacitor se encarrega de fornecer tensão para o circuito alimentado, não a deixando a tensão cair. Desta forma, a tensão aplicada a carga varia muito pouco. Esta variação ou queda é denominada "*ripple*" ou ondulação e será tanto menor quanto maior for o capacitor usado, representado na Figura 23.

**Figura 23 – Tensão de *ripple* na carga**



Fonte: Adaptado pelo autor de <http://eletronica-analogica2015.blogspot.com/2015/04/diodo-como-retificador.html> (2022).

Evidentemente, com uma variação muito pequena, já obtemos algo que se aproxima muito de uma corrente contínua pura ou filtrada. O fator de *ripple* ou ondulação é definido como a relação entre o valor RMS e valor DC da saída.

O dimensionamento do capacitor pode ser feito de maneira simplificada para uma ondulação desejada ou mínima, que por sua vez será eliminada na etapa de regulação. Sabemos que a corrente de um capacitor é definida na Equação 8.

$$I = C \frac{dv(t)}{dt} \approx C \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (8)$$

Onde:

I - Corrente no capacitor (A);

C - Capacitância (F);

$\Delta v$  - Tensão aplicada nos terminais do capacitor (V);

$\Delta t$  - tempo (s).

Com a carga acumulada no período T da onda, pode ser expressa na Equação 9:

$$C = \frac{I.T}{V_{ripple}} \quad (9)$$

Como a frequência é o inverso do período, a capacitância pode ser expressa pela Equação 10:

$$C = \frac{I}{f.V_{ripple}} \quad (10)$$

Onde:

C - Capacitância (F);

I - Corrente no capacitor (A);

$f$  - Frequência (Hz);

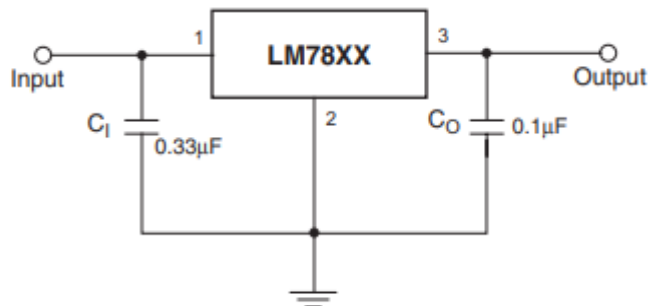
$V_{ripple}$  – Tensão de *Ripple* (V).

### 3.2.5 Regulador

Existe algumas formas de regular a tensão, uma delas é utilizar um diodo zener ou optar por um circuito dedicado a regulação, nesse caso vamos optar pelo regulador linear LM7805 que além de manter a saída em 5V é dotado de um circuito de proteção contra sobrecarga e curto-circuito. É um regulador linear muito utilizado em equipamento eletrônicos, tem a capacidade de regular tensão até 20V na sua entrada, promovendo uma na saída 5V DC. Possui uma topologia simples como podemos verificar na Figura 24, comporta uma corrente máxima de 1A na saída precisando estar acompanhado de um dissipador de calor para correntes próximas de seu limite.

Figura 24 – Configuração Típica do LM7805

#### Typical Applications



Fonte: Datasheet do componente (2022).

A forma de manter a tensão na saída regulada é dissipando o excedente de energia no formato de calor. Quanto maior for a diferença entre tensão de entrada e tensão de saída, maior será a quantidade de energia dissipada. Logo um dissipador de calor se torna necessário para garantir a integridade do componente e auxiliar no funcionamento adequado.

### 3.2.6 Circuito de carga

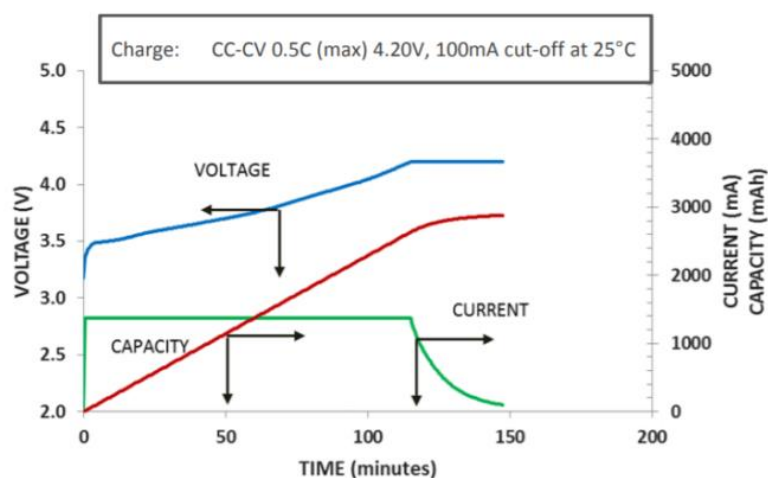
O circuito de carga é composto pelo circuito integrado TP4056 que promove um controle de carga adequado as células de Íons de Lítio, essas baterias são empregadas na maioria dos dispositivos móveis, pois possuem uma vida útil longa com alta densidade de energia.

A tensão nominal das células Li-Íon é de 3.6V, com uma pequena variação dependendo tecnologia utilizada. O dimensionamento da autonomia é calculado dividindo a capacidade nominal pela potência média consumida.

A recarga dessas baterias é um ponto crítico, por isso a utilização de um circuito integrado dedicado a essa finalidade. Uma recarga adequada garante maior vida útil a célula. A recarga é realizada em 2 ou 3 estágios, sendo os dois primeiros estágios de corrente constante e o último um estágio de tensão constante.

A Figura 25 a seguir, indica os parâmetros de recarga e resposta para recarga da NCR18650PF da Panasonic. Na indicação acima do gráfico, há uma recomendação de recarga em dois estágios a 0.5C ( $2700\text{mAh} \times 0.5\text{C} = 1350\text{mA}$ ) no estágio de corrente constante (CC) e 4.2V no estágio de tensão constante, o Cut-Off ou fim da recarga é realizado quando a célula estiver drenando apenas 100mA. Todo o processo deve ser feito à uma temperatura próxima de 25°C.

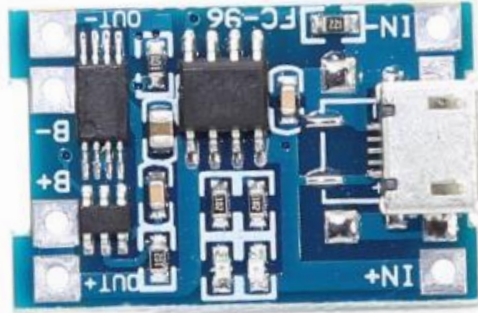
**Figura 25 – Curva de carga da célula NCR18650PF.**



Fonte: Panasonic (2022).

Para um carregamento seguro é necessário o estágio de corrente pois quando a tensão está baixa a célula se comporta como um grande capacitor que possui uma baixa resistência série levando ao aquecimento e danificando a bateria.

**Figura 26 – Módulo carregador de bateria TP4056**

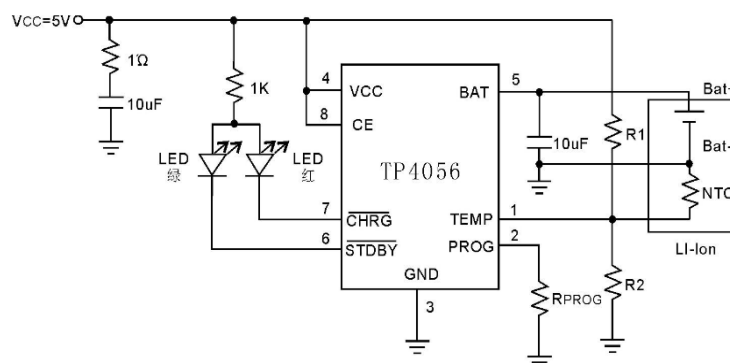


Fonte: Adaptado pelo próprio autor (2022).

O TP4056 Figura 26, possui entrada mini USB ou pinos na própria placa para fazer a conexão entre fonte e bateria. Além disso possui LED's que mostram se a carga está completa e carregando.

A tensão de entrada varia entre 4.5V e 5.5V com uma corrente de carregamento de até 1A, a temperatura de trabalho -10°C a 85°C utilizando o método de carregamento linear de 1% com precisão de carga de 1.5%.

**Figura 27 – Topologia TP4056**



Fonte: Datasheet componente (2021).

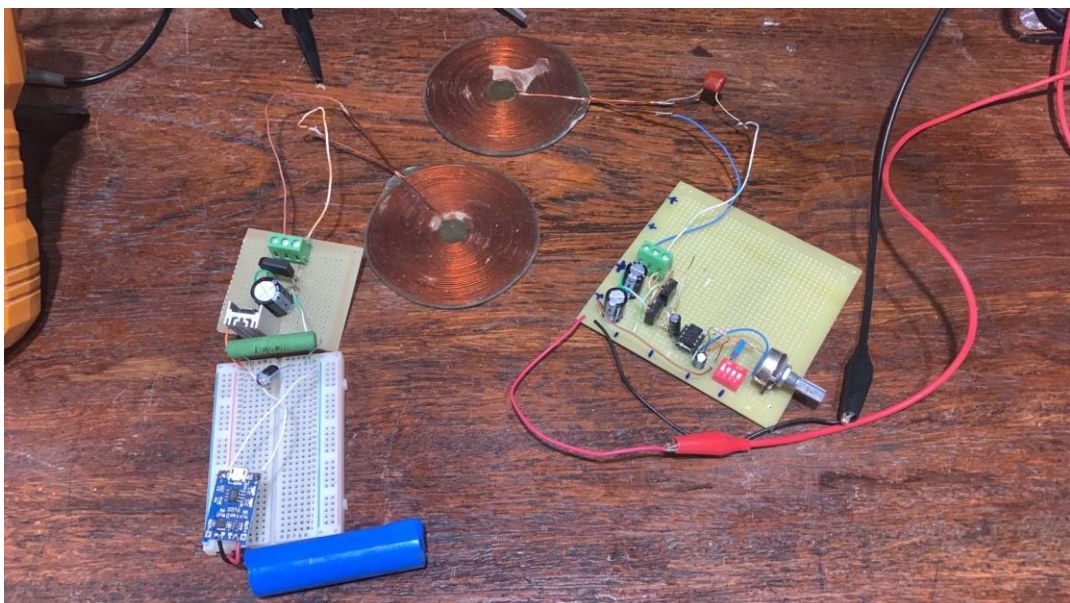
A Figura 27 mostra o esquema eletrônico que compõe o módulo do carregador de baterias baseado no circuito integrado TP4056.

### 3.3 Montagem do circuito na placa universal

Os diagramas e esquemas apresentados anteriormente serviram de base para a construção do circuito final. A implementação foi feita sobre uma placa universal de circuito impresso em fenolite, onde as trilhas são construídas pela ligação das ilhas com o próprio estanho. A Figura 28 mostra a imagem da placa final que foi utilizada nos testes de bancada.

O módulo é formado pelos elementos citados no diagrama de blocos da Figura 4 onde possui oscilador e drive acionador pelo circuito integrado IR2153 onde comanda o chaveamento dos Mosfets IRF640 que estão ligados em meia ponte garantindo uma tensão alternada para o acoplamento indutivo que ao transferir a energia para o secundário tem o bloco de retificação e regulação formada pela ponte de diodos combinado ao regulador LM7805 promovendo assim a carga uma tensão contínua de 5V com uma corrente de 1A.

**Figura 28 – Protótipo utilizado nos testes de laboratório**

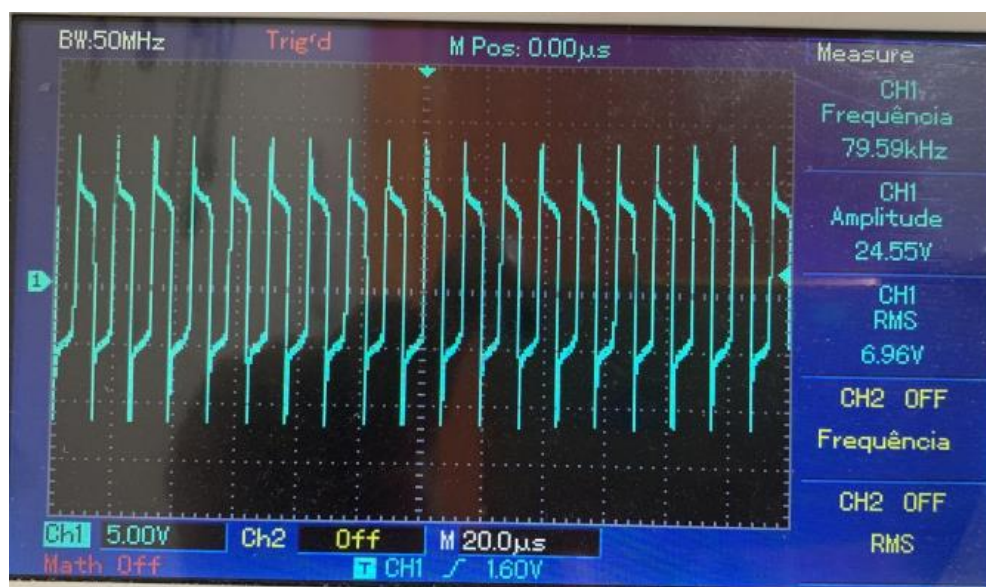


Fonte: Próprio autor (2022).

#### 4 TESTES DE BANCADA

Inicialmente o parâmetro mais importante para iniciar as medições do protótipo é a frequência de trabalho. Para determinar a melhor frequência de trabalho experimentalmente do projeto foi necessário instalar em conjunto com os componentes que determinam a frequência do oscilador (RT e CT) um potenciômetro, ele permite excursionar a frequência onde é observado a tensão na bobina do secundário, logo o melhor ponto de trabalho é determinado pela maior tensão rms nos terminais da mesma.

Figura 29 – Tensão no secundário sem carga



Fonte: Elaboração própria (2022).

A maior amplitude de tensão foi determinada com as bobinas centralizadas a uma distância 1 mm na frequência de aproximadamente 79,6 kHz como mostra a Figura 29, porém ao adicionar a carga a frequência onde permitiu a melhor transferência de energia foi de aproximadamente 66,8Khz que foi adotada como frequência de trabalho.

Percebe-se que essa frequência está ligeiramente distante da frequência calculada anteriormente, visto que alguns parâmetros foram desprezados para simplificar os cálculos, como por exemplo a resistência série do capacitor, indutor e

as tolerâncias dos componentes utilizados. Contudo, se aproxima da frequência encontrada no simulador MULTISIM com uma carga de 5 Ohms, como mostra a figura 18.

De posse da frequência de trabalho é possível dimensionar corretamente o capacitor de filtro da carga  $C_6$  e os capacitores responsáveis por fornecer carga a bobina primária do protótipo  $C_8$ . Adotando uma corrente de 1A para os capacitores com uma tensão de ripple de 0.1V, obtém-se pela equação 10.

$$C_6 = \frac{I}{f \cdot V_{ripple}} = 149,701 \mu F \quad \text{e} \quad C_8 = \frac{I}{2 \cdot f \cdot V_{ripple}} = 74,85 \mu F$$

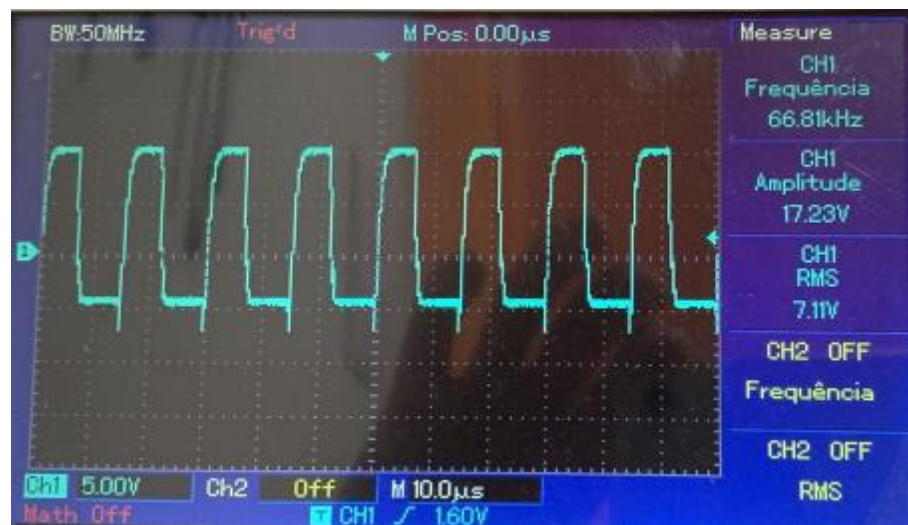
Ou seja, uma capacitância mínima de aproximadamente 150uF para o capacitor que fornece energia a bobina primária e uma capacitância mínima de 75uF para a carga, importante escolher capacitores com tensão de trabalho acima da tensão de pico aplicada aos mesmos.

Por disponibilidade foi adotado capacitores com valores de 1000uF por 25V para ambos os casos utilizados respectivamente em C3, C4 e C6 como mostra a Figura 10.

#### 4.1 Aquisição de medidas sem carga

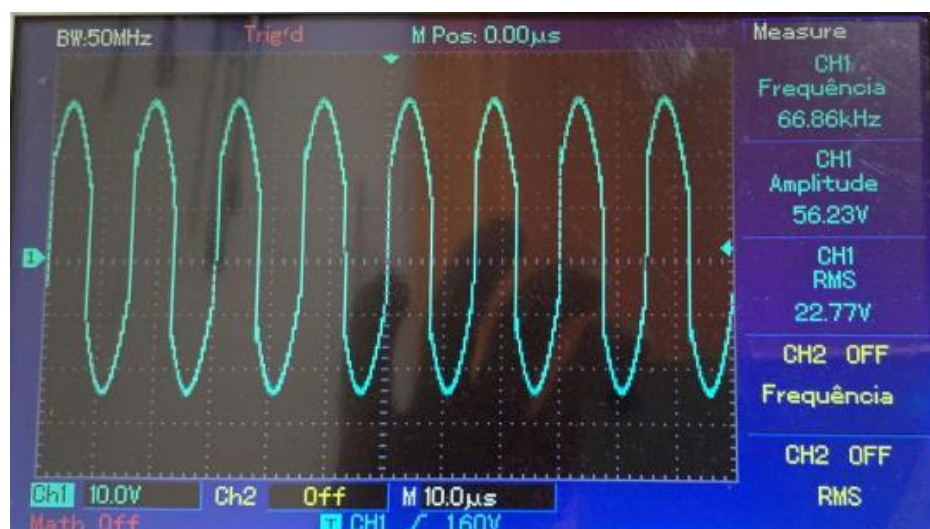
Abaixo segue as imagens das medidas de laboratório da tensão nos terminais das bobinas e na saída do estágio de potência considerando um VCC de 24V fornecido por uma fonte de bancada auxiliar.

Figura 30 – Tensão no gate do mosfet sem carga



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 31 – Tensão no primário sem carga



Fonte: Elaboração própria (2022).



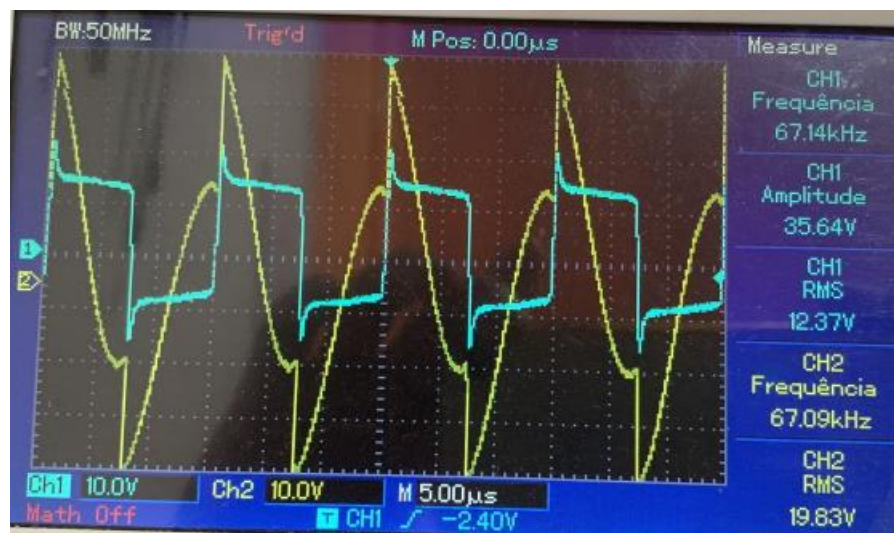
Figura 34 – Tensão no gate do mosfet com carga



Fonte: Elaboração própria (2021).

Na figura 35 temos a imagem da forma de onda de tensão na bobina primária em amarelo e a tensão na bobina secundária em azul.

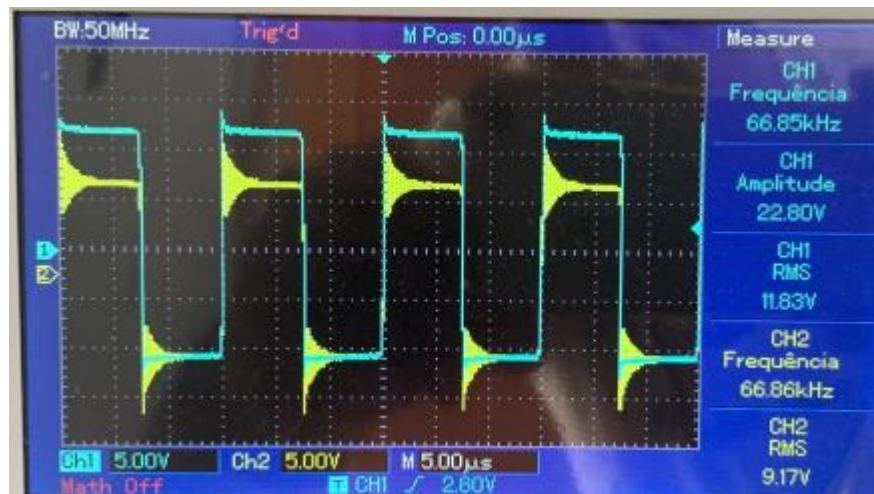
Figura 35 – Tensão no primário e secundário com carga



Fonte: Elaboração própria (2021).

A figura 36 mostra a forma de onda da tensão medida na saída do inversor e na bobina secundária com carga.

Figura 36 – Tensão na saída inversor e secundário com carga



Fonte: Elaboração própria (2021).

### 4.3 Teste de carga

Para efetuar o teste de potência na carga foi instalado um multímetro na função voltímetro sobre o resistor de 5,6 Ohms, possibilitando a verificação da tensão na mesma, assim é possível estimar a potência dissipada na carga utilizando a Equação 11.

$$P := \frac{V^2}{R} \quad (11)$$

Onde:

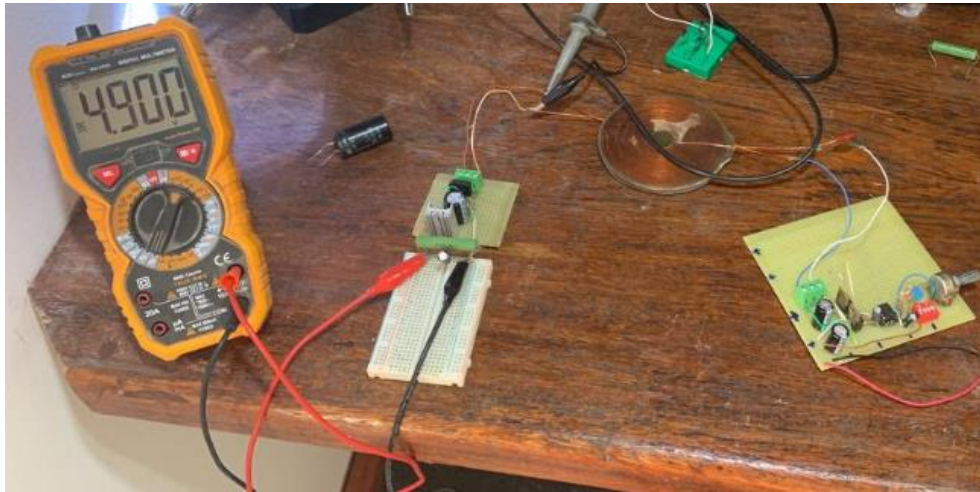
P – Potência;

V – Tensão (V);

R – Resistência ( $\Omega$ );

Pela Figura 37 sabemos que a tensão sobre a carga é de 4,9V, logo aplicando a equação acima obtemos uma potência dissipada na carga de aproximadamente 4,3 W que está próxima da especificação de projeto.

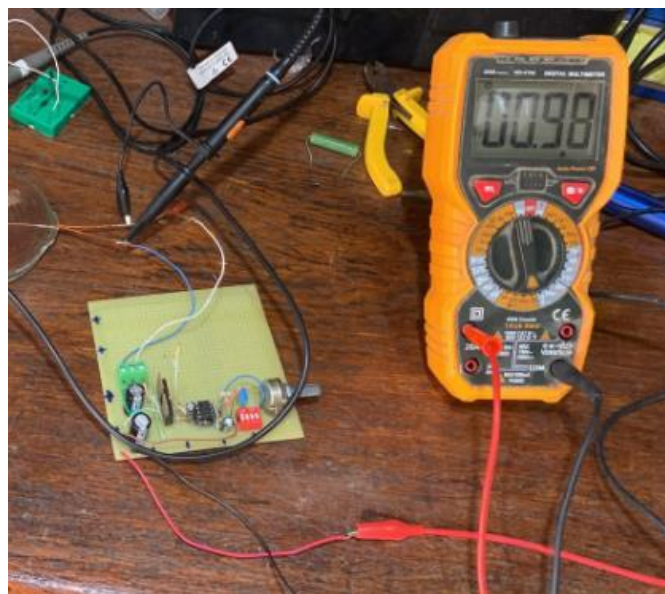
**Figura 37 – Tensão na carga**



Fonte: Elaboração própria (2021).

Outro ponto de interesse é a potência consumida pelo dispositivo, para estimar essa potência foi adicionado a entrada do protótipo o multímetro ICEL MD6199 na configuração de amperímetro que possui uma especificação de leitura *true rms* na faixa de 40 Hz a 1 kHz não sendo adequado para a leitura da corrente no estágio de entrada, pois o chaveamento ocorre na casa dos 70 kHz. Mesmo assim utilizou-se esse instrumento possibilitando encontrar uma aproximação da corrente consumida pelo sistema.

**Figura 38 – Corrente de entrada no protótipo**



Fonte: Elaboração própria (2021).

Pela figura 37 sabemos que a corrente que entra no protótipo é de 0,98 A e que está sendo alimentado a uma tensão de 24 V, então pela equação 12 temos que a potência consumida é de aproximadamente 23,5 W.

$$P := V \cdot I \quad (12)$$

Onde:

P – Potência (W);

V – Tensão (V);

I – Corrente (A).

Tem-se então uma eficiência de aproximadamente 18%, porém vale ressaltar que estamos tratando de um circuito magneticamente acoplado com núcleo de ar e que a motivação do protótipo visa a praticidade e a necessidade de utilizar um dispositivo sem fio.

## 5 CONCLUSÃO

A partir do observado, conclui-se que o protótipo desenvolvido para esse trabalho atende de forma geral os parâmetros de projeto, e que a falta de algumas variáveis influenciou de forma substancial o funcionamento do mesmo. Um ponto importante foi a frequência de trabalho, que teve seu valor experimental um pouco acima do estimado. Outro fato importante foi a substituição do circuito de oscilação por um circuito integrado dedicado a esse trabalho, garantindo a potência necessária para o chaveamento do sistema. Também no sistema de oscilação a implementação do potenciômetro nesse circuito permitiu a obtenção experimental da melhor frequência de chaveamento dos mosfets.

O dimensionamento adequado para alguns componentes críticos, como por exemplo a ponte de diodo que em alguns ensaios de laboratório queimou por estar bem no limite de trabalho, sendo substituída por uma ponte de maior capacidade tornando o dispositivo mais robusto.

Recomenda-se para trabalhos futuros que sejam feitos alguns aprimoramentos no circuito, como por exemplo a implementação de um algoritmo lógico para determinar a melhor frequência de trabalho e também uma lógica que permita ligar e desligar o circuito quando estiver em tempo ocioso.

Como lição aprendida durante o desenvolvimento do trabalho, pode-se citar a combinação de diversas áreas do conhecimento para elaboração e obtenção de um protótipo que atendesse as expectativas.

## REFERÊNCIAS

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à Análise de Circuitos**. 10ª Ed. Prentice Hall/Pearson, 2004.

BRAGA, Newton C.. **Filtragem e Ripple (ART1204)**. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/54-dicas/5389>. Acesso em: 09 jan. 2022.

CASTRO, Wendel Riguete de; FIALHO, Edvaldo da Silva; CAVALHIERE, Marcos Vinicius; COELHO JUNIOR, Ivamar Rodrigues; LOPES, Paulo Henrique Silva. **Tecnologia de Transmissão de Energia Sem Fio (Wireless Power Transfer)**. Revista Mythos, [S.L.]. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.36674/mythos.v15i1.567>. Acesso em: 15 de ago. 2021.

COVIC, G. A. Modern trends in inductive power transfer for transportation applications. IEEE **Journal of Emerging and Selected topics in power electronics**, 2013. p.28-41.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de Pesquisa Social**. 6ª edição. Atlas, 2008.

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

KESLER, M. P. **Highly Resonant Wireless Power Transfer: Safe, Efficient, and over Distance**. WiTricity Corporation. 2017.

KURS, A. **Power Transfer Through Strongly Coupled Resonances**. Massachusetts, ago. 2007. Institute of Technology, Massachusetts. Disponível em: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/45429/317879200-MIT.pdf?sequence=2> . Acesso em: 13 de ago. 2021.

KUZEYA, S., BALCIB, S., e ALTIN, N. **Design and analysis of a wireless power transfer system with alignment errors for electrical vehicle applications**. International Journal of Hydrogen Energy, 17928-17939. 2017.

LEMOS, André. **Comunicação e práticas sociais no espaço urbano: as características dos Dispositivos Híbridos Móveis de Conexão Multirredes (DHMCM)**. **Revista Comunicação Mídia e Consumo**, v. 4, n. 10, jul., p. 23-40, 2007.

MYUNGHYORYU, H. C. **Analysis of the contact less power transfer system using model ling and analysis of the contact less transformer**. Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE. 2005.

WENDLING, Marcelo. **RETIFICADORES**. São Paulo: Prof Marcelo Wendling, 2011. 19 slides, color. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/3---retificadores.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2022.

**WHEELER, L. P. Tesla's contribution to high frequency. Electrical Engineering, 62, 355-357. 1943.**

WOLLINGER, Leonardo. **Baterias de Lítio-Íon: Um guia completo.** Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/baterias-de-litio-ion-um-guia-completo/>. Acesso em: 15 jan. 2022.

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