

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS**
CAMPUS DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Marcos Alberto Saldanha

**Projeto e implementação de um sistema *Power Line Communication*
aplicado em automação remota**

Divinópolis.

2015.

Marcos Alberto Saldanha

Projeto e implementação de um sistema *Power Line Communication* aplicado em automação remota

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Eletrônica, Computação.

Orientador: Prof. Me. Alan Mendes Marotta

Coorientador: Prof. Me. Claudio Henrique Gomes dos Santos.

Divinópolis.

2015.

Marcos Alberto Saldanha

Projeto e implementação de um sistema *Power Line Communication* aplicado em automação remota

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Eletrônica, Computação.

Comissão Avaliadora:

Prof. Me. Ignacio Rubio Scola
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET MG

Prof. Me. Jean Carlos Pereira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET MG

Divinópolis.
2015.

Dedico este trabalho aos meus pais, Afonso Libério Saldanha e Maria Aparecida Saldanha, e a minha irmã, Aline Aparecida Saldanha, pelos incentivos constantes dos meus estudos e por sempre me apoiarem durante os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e proporcionar segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

Aos meus amigos e colegas pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas.

À todos os professores que me acompanharam durante a graduação, em especial ao Prof. Me. Alan Mendes Marotta e ao Prof. Me. Claudio Henrique Gomes dos Santos, responsáveis pela realização deste trabalho.

E a todos que de forma direta ou indiretamente que fizeram parte da minha formação.

"Ninguém poderá jamais aperfeiçoar-se,
se não tiver o mundo como mestre. A
experiência adquire-se na prática."

(William Shakespeare)

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso trata da implementação de um sistema *Power Line Communication* (PLC) aplicado em automação remota. Nesse sistema, a rede elétrica será utilizada como canal de comunicação para um sinal transmitido, o qual acionará e controlará a potência entregue a uma carga. Trata-se de um trabalho de investigação que abrange as seguintes áreas da engenharia mecatrônica: eletrônica e programação. O desenvolvimento deste projeto possui como justificativa a implementação de um sistema que possua menor custo se comparado aos convencionais, isso devido o uso da rede elétrica como canal. Além disso, será avaliado se a tecnologia PLC aplicada em automação remota é viável no âmbito econômico em relação a outros meios de transmissão sem fio como: *WiFi*, *Bluetooth*, módulo NRF 24L01 e *ZigBee*. Inicialmente, foi selecionada a frequência de transmissão do sinal. Com a especificação da frequência foram projetados e simulados os circuitos que compõe um protótipo de um sistema PLC. Em seguida, este sistema foi parcialmente implementado e testado. Até o presente momento, foi possível com o desenvolvimento deste trabalho, injetar e desacoplar um sinal da rede elétrica. Ainda está em desenvolvimento a etapa de implementação e teste do amplificador não-inversor e circuito optoacoplador. Em relação ao custo financeiro, o sistema de transmissão de dados proposto (PLC) foi o segundo com menor custo, o que enfatiza a importância do presente estudo.

Palavras-chave: *Power Line Communication*. Automação remota. Comunicação sem fio.

ABSTRACT

This course conclusion work deals the implementation of a *Power Line Communication* system (PLC) applied in remote automation. In this system, the electrical network will be used as a communication channel to a transmitted signal, which trigger and control the power delivered to a charge. This is a research project covering the following areas of mechatronics engineering: electronics and programming. The development of this project has to justify the implementation of a system that has lower cost compared to conventional, that result from use of the electrical network as a channel. In addition, it will be assessed whether the PLC technology applied in remote automation is viable in the economic context in relation to other wireless transmission means such as *WiFi*, *Bluetooth*, *ZigBee* module and NRF 24L01. Initially, it selected the signal transmission frequency. By specifying the frequency they were designed and simulated circuits that comprise a prototype of a PLC system. Then, this system has been partially implemented and tested. Until now, it was possible to develop this work, inject and decouple a signal from the electrical network. It is still in the development the stage of implementation and test of non-inverting amplifier and optocoupler circuit. Regarding the financial cost, the proposed data transmission system (PLC) was the second with lower cost, which emphasizes the importance of this study.

Keywords: *Power Line Communication*. Remote Automation. Wireless communication.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Módulo NRF24L01 (Fonte: FRITZING, 2015).....	6
Figura 2.2 - Arduino Mega 2560 (Fonte: ARDUINO, 2015).....	7
Figura 2.3 - Gráfico de Bode de um filtro passa baixa passivo (Fonte: OLIVEIRA, LÚCIO e NETO, 2009).....	8
Figura 2.4 - <i>Pulse Width Modulation</i> com diferentes <i>duty cycle</i>	9
Figura 4.1 – Diagrama de blocos do protótipo inicial.....	14
Figura 4.2– Acoplador indutivo/capacitivo.....	15
Figura 4.3 – Implementação do circuito acoplador indutivo/capacitivo.....	15
Figura 4.4 – Diagrama de blocos do protótipo final.....	16
Figura 4.5 – Configuração do circuito oscilador.....	17
Figura 4.6 – Circuito oscilador projetado.....	18
Figura 4.7 – Circuito buffer.....	19
Figura 4.8 – Filtro passa alta passivo.....	20
Figura 4.9 – Configuração do filtro passa-faixa de segunda ordem.....	20
Figura 4.10 – Filtro passa-faixa de segunda ordem obtido.....	21
Figura 4.11 – Amplificador não-inversor projetado.....	22
Figura 4.12 – Circuito optoacoplador.....	22
Figura 4.13 – Unidade microcontrolada (Arduino Mega 2560).....	23
Figura 4.14- Driver para acionamento de um motor CC.....	24
Figura 4.15 – Implementação dos circuitos projetados: (a) Acoplador capacitivo/indutivo; (b) oscilador; (c) buffer; (d) filtro passa alta passivo; (e) filtro passa-faixa ativo; (f) amplificador não-inversor.....	26
Figura 4.16- Fluxograma do código para controle de potência de cargas.....	27
Figura 5.1 – Protótipo inicial: Sinal proveniente do gerador de sinais acoplado na rede elétrica.....	28
Figura 5.2 – Oscilador: (a) Simulação do oscilador para 15 V; (b) teste com o oscilador para 15 V.....	30
Figura 5.3 – Buffer: (a) Simulação do buffer; (b) teste do buffer.....	31
Figura 5.4- Resposta do acoplador capacitivo/indutivo sem estar conectado a rede elétrica.....	32
Figura 5.5 – Acoplagem do sinal de 110 kHz na rede elétrica.....	33

Figura 5.6 – Análise de espectros do sinal injetado no canal à um distância de 2 metros do ponto de acoplagem do mesmo.....	34
Figura 5.7 - Gráfico de Bode do filtro passa alta passivo.....	35
Figura 5.8- Filtro passa alta: (a) Simulação; (b) teste.....	36
Figura 5.9 – Resposta do filtro passa faixa.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Subcategorias da faixa de frequência do padrão EN500065 da CENELEC.....	13
Tabela 5.1 – Orçamento dos métodos de transmissão de dados (PLC, WiFi, ZigBee, módulo NRF 24L01 e bluetooth).....	37

LISTA DE NOTAÇÕES E ACRÔNIMOS

Letras Latinas

C1 – Capacitor 1 [F]

C2 – Capacitor 2 [F]

C3 – Capacitor 3 [F]

C4 – Capacitor 4 [F]

C5 – Capacitor 5 [F]

F_{gerada} = Frequência gerada (110 kHz)

R_A – Resistor A [Ω]

R_B – Resistor B [Ω]

R_{base} – Resistor Base [Ω]

R1 - Resistor 1 [Ω]

R2 - Resistor 2 [Ω]

R3 - Resistor 3 [Ω]

R4 - Resistor 4 [Ω]

R5 - Resistor 5 [Ω]

R6 - Resistor 6 [Ω]

R7 - Resistor 7 [Ω]

R8 - Resistor 8 [Ω]

R9 - Resistor 9 [Ω]

R10 - Resistor 10 [Ω]

Letras Gregas

Ω - Resistência/Impedância [ohm]

Acrônimos

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações

APTEL - Associação de Empresas Proprietárias de Infraestrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações

CC - Corrente Contínua

CENELEC - *European Committee for Electrotechnical Standardization*

DPL - Digital Power Line

FFT - *Fast Fourier Transform*

GFSK - *Gaussian Frequency Shift Keying*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LED - *Light Emitting Diode*

PLC - *Power Line Communication*

PWM - *Pulse Width Modulation*

RC - *Ripple Control*

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO.....	16
1.1- Definição do problema.....	2
1.2- Motivação.....	2
1.3- Objetivo geral.....	3
1.4- Objetivos específicos.....	3
2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1- <i>Power Line Communication</i>	3
2.2- Acoplador.....	4
2.2.1- Acoplador indutivo.....	4
2.2.2- Acoplador capacitivo.....	4
2.3- <i>Wireless</i>	4
2.3.1- <i>WiFi</i>	5
2.3.2- <i>Bluetooth</i>	5
2.3.3- <i>ZigBee</i>	5
2.3.4- Módulo NRF24L01.....	6
2.4- Arduino Mega 2560.....	6
2.5- Função de transferência.....	7
2.6- Gráfico de Bode.....	7
2.7- <i>Pulse Width Modulation</i>	8
3- REVISÃO DA LITERATURA.....	9
4- METODOLOGIA.....	11
4.1- Laboratórios.....	11
4.2- Softwares.....	11
4.3- Equipamentos.....	12
4.4- Materiais.....	12
4.5- Procedimentos.....	13
4.5.1- Protótipo inicial.....	14
4.5.2- Projeto dos circuitos do protótipo inicial.....	14
4.5.2.1- Acoplamento capacitivo/indutivo.....	15
4.5.3- Protótipo final.....	16
4.5.3.1- Projeto dos circuitos do protótipo final.....	17
4.5.3.1.1- Oscilador.....	17
4.5.3.1.2- Buffer.....	18

4.5.3.1.3- Desacoplamento.....	19
4.5.3.1.3.1- Filtro passa alta	19
4.5.3.1.3.2- Filtro passa-faixa de segunda ordem	20
4.5.3.1.3.3- Amplificador não-inversor	21
4.5.3.1.3.4- Optoacoplador	22
4.5.3.1.4- Unidade microcontrolada.....	23
4.5.3.1.5- Driver para acionamento de um motor CC	23
5.5.2.3- Programação da unidade microcontrolada.....	27
5.5.2.3- Análises estatísticas	28
5- RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
5.1 – Protótipo Inicial	28
5.2 – Protótipo final.....	29
5.2.1 - Oscilador	29
5.2.2 – Buffer	30
5.2.3 – Acoplador capacitivo/indutivo	32
5.2.4 – Filtro passa alta passivo	34
5.2.5 – Filtro passa faixa	36
5.2.6 – Análise da viabilidade financeira do sistema PLC	37
6- CONCLUSÕES.....	38
7- PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	38
8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
APÊNDICE A	43
APÊNDICE B	45

1- INTRODUÇÃO

A automação remota, que se entende pela automação de equipamentos que não estão presentes no mesmo ambiente da central de comando, encontra-se em contínua expansão de mercado e engloba, principalmente, as automações residencial (domótica) e industrial. Uma dessas áreas, a domótica, possui um crescimento anual superior a 10%, especialmente em países desenvolvidos (FARIA, 2011).

Entretanto, a implementação da automação remota possui algumas dificuldades. Uma delas é o alto custo devido à necessidade de instalação de um meio dedicado para a comunicação entre os componentes do sistema (DOURADO, 2004). Outros empecilhos são encontrados com o uso de *wireless*, como a qualidade de serviço e taxa de transmissão de dados baixas (se comparadas as redes cabeadas), o custo elevado dos equipamentos da rede sem fio e maior sensibilidade a interceptores indesejados (JUNIOR e SILVA, 2015).

A necessidade da modificação do sistema elétrico pré-existente e as desvantagens das comunicações sem fio, mencionadas anteriormente, corroboram com a importância do surgimento de novos métodos de transmissão de dados mais viáveis economicamente. Um desses métodos é denominado *Power Line Communication* (PLC).

A tecnologia PLC possui grande vantagem econômica em relação a outros processos empregados na transmissão de sinais. Isso devido à utilização de uma infraestrutura básica já existente para transportar dados, a rede elétrica (VARGAS *et al.*, 2004).

De acordo com o censo de 2010 divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 97,8% dos brasileiros tem acesso ao serviço de energia elétrica (IBGE, 2010).

Com o intuito de desenvolver processos de automação remota com baixos investimentos financeiros, o presente estudo tem por objetivo a implementação destes processos utilizando a tecnologia *Power Line Communication*.

1.1- Definição do problema

Os projetos de automação remota convencionais necessitam da modificação da rede elétrica pré-existente ou utilizam a comunicação sem fio, a qual geralmente possui investimentos financeiros consideráveis. No estudo realizado por Silveira, Ribeiro e Martins (2014), o sistema implementado para automação residencial possuía a transmissão dos dados por meio de cabamentos específicos, resultando em um custo de R\$ 662,00. Em contrapartida, espera-se que o sistema a ser desenvolvido no presente trabalho seja menos oneroso.

Com o intuito de reduzir os custos, é possível eliminar a instalação de novas redes de cabamentos e de transmissores e receptores dos sistemas sem fio. Dessa forma, os sinais responsáveis pela automação serão transmitidos utilizando a rede elétrica já existente como canal. A tecnologia em questão é a *Power Line Communication* aplicada em automação remota.

1.2- Motivação

A motivação principal para o desenvolvimento desse tema é o potencial tanto em termos de aplicabilidade quanto comercial do mesmo. Já que este possibilita o uso da rede elétrica para transmitir dados, o que proporciona uma redução nos investimentos financeiros para sua implementação. Além disso, com os avanços tecnológicos, os sistemas que utilizam *Power Line Communication* estão ganhando ênfase em pesquisas.

O autor, ao cursar o oitavo período (Jan. 2015), ficou a par da existência da tecnologia *Power Line Communication* ao conversar com o Prof. Me. Alan Mendes Marotta. Para aplicação desta tecnologia o engenheiro mecatrônico utiliza como ferramentas as áreas computação e eletrônica. O graduando possui afinidade e interesse por ambas áreas e o desenvolvimento deste projeto possibilitará a ampliação de seus conhecimentos.

1.3- Objetivo geral

Projetar e desenvolver um sistema *Power Line Communication* para automação remota e averiguar sua viabilidade financeira em relação a alguns meios de comunicação sem fio.

1.4- Objetivos específicos

Nesses termos, os objetivos específicos do trabalho são:

- Selecionar a frequência mais apropriada para o transporte de sinais via rede elétrica;
- Projetar, simular e implementar um protótipo em que sinais provenientes de um gerador de sinais são injetados na rede elétrica (canal);
- Substituir o gerador de sinais por um painel com botoeiras e circuito oscilador;
- Programar um microcontrolador (ATmega 2560 ou similar) para o acionamento e/ou controle de potência das respectivas cargas das botoeiras pressionadas;
- Analisar e comparar o investimento financeiro do sistema PLC desenvolvido com métodos de comunicação sem fio como *WiFi*, *ZigBee*, *Bluetooth* e o módulo de comunicação NRF 24L01.

2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1- *Power Line Communication*

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (2009), “o *Power Line Communication* (PLC) é um sistema de telecomunicações que utiliza a rede elétrica como meio de transporte para a comunicação digital e analógica de sinais como Internet, vídeo e voz. Assim, a tomada que liga os eletrodomésticos pode se tornar um ponto de rede de dados para a provedora de Internet ou TV por assinatura, por exemplo”.

O princípio de funcionamento da tecnologia PLC consiste em utilizar a tensão de 60 Hz da rede elétrica como canal para sinais de altas frequências.

2.2- Acoplador

Os acopladores são dispositivos responsáveis pela interligação de duas redes que possuem características diferentes. Existem dois métodos de acoplamento: capacitivo e indutivo (DOURADO, 2004).

2.2.1- Acoplador indutivo

O dispositivo utiliza um indutor para injetar o sinal desejado no canal. O acoplamento é realizado magneticamente, pois é realizado por um transformador, o que fornece um isolamento físico entre o circuito de entrada com a rede elétrica. No entanto, o uso de transformadores promove o aumento do volume e custo do acoplador (DOURADO, 2004).

2.2.2- Acoplador capacitivo

Nesse acoplador é utilizado um capacitor para se realizar o acoplamento entre as duas redes. Esse método possui como vantagens o baixo custo, fácil manuseio e pode trabalhar com frequências relativamente altas. No entanto, esse dispositivo não promove o isolamento físico entre as redes (DOURADO, 2004).

2.3- Wireless

As tecnologias que possuem como princípio de funcionamento a transmissão de dados sem fio são denominadas *wireless*. Alguns exemplos destas tecnologias são: *WiFi*, *Bluetooth*, *ZigBee* e o módulo NRF24L01 (OFICINA DA NET, 2015).

2.3.1- WiFi

A tecnologia IEEE 802.11, popularmente conhecida como *WiFi*, possibilita a comunicação entre diversos dispositivos sem fio. Esta tecnologia possui como princípio de funcionamento a transmissão de dados por meio de ondas de rádio. As ondas são enviadas utilizando-se um adaptador denominado “roteador” (LANDIM, 2012).

O roteador recebe os sinais e os decodifica. Em seguida, os envia por meio de uma antena para outros dispositivos que tenham acesso a rede. Essa possui um alcance de transmissão que pode variar de 100 metros, em ambientes internos, a até 300 metros, em ambientes externos (LANDIM, 2012).

2.3.2- Bluetooth

Bluetooth é uma interface de rádio frequência que permite a conexão e comunicação sem fio entre dispositivos eletrônicos. Cada unidade Bluetooth pode comunicar simultaneamente com até sete outras unidades, criando uma rede (HAARTSEN, 1998). Nessa rede, um dispositivo desenvolve a função de mestre, enquanto o restante são escravos (MCDERMOTT-WELLS , 2004-2005).

O alcance de dispositivos *Bluetooth* é restrito em aproximadamente 10 metros (MONSIGNORE, 2007).

2.3.3- ZigBee

Segundo Monsignore (2007) “*ZigBee* é um padrão de comunicação *wireless* que provê uma rede de curto alcance e boa relação custo benefício. Foi desenvolvido com ênfase em aplicações de baixo custo alimentadas por bateria, tais como automação predial, controle industrial e comercial, marinha sem fio, assistência médica pessoal e sistema de *tag* avançados.”

O *ZigBee* possui como características principais: taxa de dados de até 250 kbps, baixo consumo de potência, curto alcance (10 a 100 metros) e protocolo simples. O último possibilita a utilização de microcontroladores de baixo custo (STREETON e STANFIELD, 2005).

2.3.4- Módulo NRF24L01

O módulo NRF24L01, fabricado pela Nordic, é um transceptor que possibilita a comunicação *wireless* entre dispositivos como microcontrolador, Arduino, entre outros. Este módulo possui como principais características: alcance entre 10 a 50 metros, opera na frequência de 2,4 GHz com velocidade de operação de 2 Mbps, modulação GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*), comunicação multi-ponto de 125 canais (FILIFELOP, 2015).

O módulo pode ser observado na Figura 2.1.



Figura 2.1 - Módulo NRF24L01 (Fonte: FRITZING, 2015).

2.4- Arduino Mega 2560

O Arduino Mega 2560 é uma placa microcontrolada implementada para o microcontrolador ATmega2560. Essa placa possui 54 pinos de entradas/saídas digitais, 16 entradas analógicas, 4 UARTs (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), um cristal oscilador de 16 MHz, uma conexão USB (*Universal Serial Bus*), uma entrada de alimentação, uma conexão ICSP (*In Circuit Serial Program*) e um botão de reset (MULTILÓGICA SHOP, 2015).

A linguagem aplicada na programação do microcontrolador ATmega2560 é a linguagem Arduino, a qual é baseada em C/C++ (ARDUINO, 2015).

O Arduino Mega 2560 está representado na Figura 2.2.

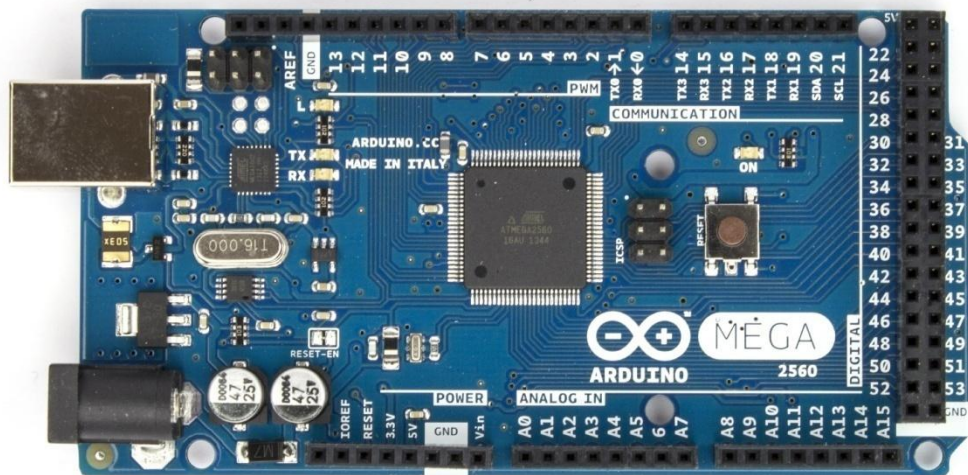


Figura 2.2 - Arduino Mega 2560 (Fonte: ARDUINO, 2015).

2.5- Função de transferência

Uma função de transferência é um modelo matemático, no domínio da frequência, de um sistema que relaciona sua resposta ($Y(s)$) com um sinal de entrada ou excitação ($U(s)$), como mostrado na Equação 2.1 (BOJORGES, 2015).

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (2.1)$$

Com a função de transferência é possível determinar o comportamento do sistema para diferentes entradas, projetar controladores, plotar gráficos de Bode, por exemplo.

2.6- Gráfico de Bode

O gráfico de Bode, também denominado diagrama de Bode ou curva de Bode, é uma ferramenta visual utilizada para estudar uma resposta em

frequência. Este gráfico consiste de um diagrama com uma escala linear de ganho (magnitude) na ordenada (geralmente em decibéis (dB)) e uma escala logarítmica na abscissa de frequência (em Hertz (Hz) ou em velocidade angular

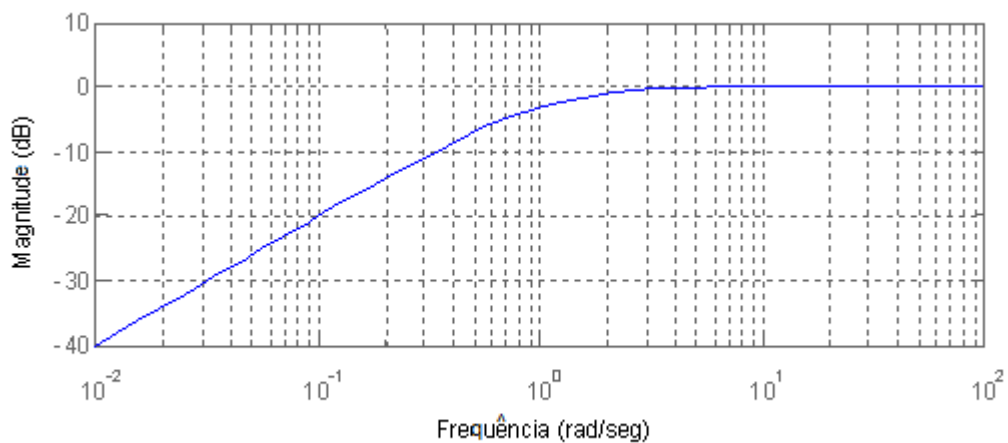


Figura 2.3 - Gráfico de Bode de um filtro passa baixa passivo (Fonte: OLIVEIRA, LÚCIO e NETO, 2009).

(rad/s)). Isso possibilita o aumento da faixa de frequências que podem ser representadas no eixo horizontal, como está disposto na Figura 2.3 (OLIVEIRA, LÚCIO e NETO, 2009).

2.7- Pulse Width Modulation

Pulse Width Modulation (PWM) é uma técnica empregada, em sistemas que possuem frequência inferior à frequência do PWM, para obtenção de resultados analógicos utilizando sinais digitais. Esses sinais são usados para gerar uma onda quadrada pulsante, ou seja, o sinal digital é chaveado entre nível alto e baixo. Sendo a duração do nível alto denominado como *duty cycle*, o qual é variado para se obter o valor analógico desejado. Por meio da variação do *duty cycle* é possível modificar a velocidade de um motor, por exemplo (ARDUINO, 2015).

A Figura 2.4 demonstra uma simulação de PWM para diferentes *duty cycle* e com nível alto e baixo iguais a 5 V e 0 V, respectivamente.

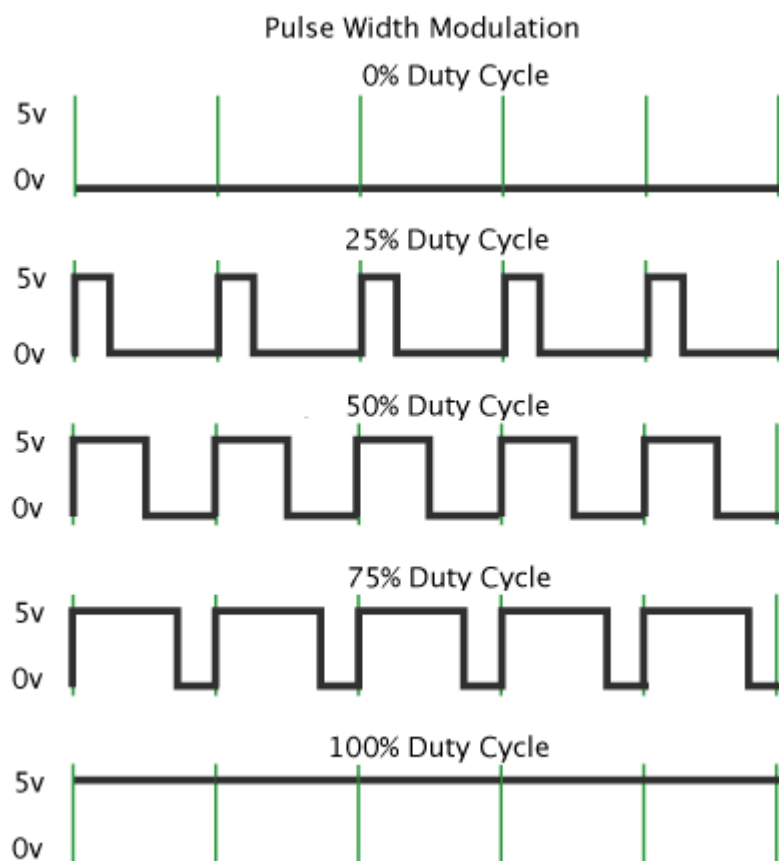


Figura 2.4 - *Pulse Width Modulation* com diferentes *duty cycle*.

Caso os PWM's com diferentes *duty cycle* apresentados na Figura 2.4 forem aplicados em um LED, diodo emissor de luz. Esse componente eletrônico irá apresentar máximo, médio e mínimo brilho quando o *duty cycle* for igual a 100%, 50% e 0%, respectivamente.

3- REVISÃO DA LITERATURA

A tecnologia *Power Line Communication* vem sendo abordada em vários estudos desde seu surgimento, o que resultou na diversificação de suas aplicações que incluem acesso à internet, automações residenciais e industriais. As primeiras propostas de uso do PLC remetem-se à década de 1920, quando ocorreram propostas da utilização da rede elétrica como portadora. Sendo seus supostos sinais modulados de forma analógica na faixa de 15 a 50 kHz. No entanto, naquela época não havia técnicas que permitissem a aplicação desta tecnologia (SANTOS, 2008).

Em 1930 surgiu a primeira técnica que possibilitou o uso da rede elétrica como portadora na transmissão de dados. Esta era denominada de *Ripple Control* (RC), cuja função era transmitir sinais de controle de baixas frequências (0,1 a 0,9 kHz), o que era feito com pequenas taxas e altas potências. A RC foi utilizada até a década de 80. Ela permitia a comunicação de modo unidirecional e foi empregada em atividades como a iluminação pública, telemetria, controle remoto e comunicação de voz (SANTOS, 2008).

No princípio dos anos 90, o Dr. Paul Brown da Norweb Communications (empresa de energia elétrica situada em Manchester, Inglaterra) iniciou experimentos com comunicação digital de alta velocidade utilizando a rede elétrica como portadora. Entre 1995 e 1997, foi comprovada a viabilidade de transmitir dados em altas velocidades e a possibilidade da redução dos efeitos de atenuações (GUNGOR E LAMBERT, 2006).

Em 1997, as empresas Nortel e Norweb anunciaram que foi efetuado o primeiro teste de acesso à Internet, o que ocorreu na escola de Manchester. Isso permitiu o surgimento da Digital Power Line, desenvolvida pelas mesmas empresas responsáveis pelo teste (MAXIM INTEGRATED, 2015).

Depois, no ano de 1998, as empresas Norte e Norweb, em parceria, criaram uma nova empresa denominada de NOW.WEB DPL com o objetivo de desenvolver e comercializar Digital Power Line (DPL). Enquanto isso, no Brasil, os avanços tecnológicos relacionados à tecnologia Power Line eram acompanhados na época pelo subcomitê de comunicações do GCOI (TEXAS INSTRUMENTS, 2015).

Em 1999 foi criada a APTEL (Associação de Empresas Proprietárias de Infraestrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações), a qual realizou seu primeiro seminário em 27 de Setembro desse mesmo ano, cujo tema foi: Tecnologia Power Line Communications (PLC) (TEXAS INSTRUMENTS, 2015).

Já em 2004, Alexandre Dourado desenvolveu um trabalho de conclusão de curso no qual projetou um par de acopladores capazes de inserir e remover sinais da rede elétrica. Além disso, realizou comparações com a solução padrão utilizada naquela época. Essas comparações possibilitaram concluir que o acoplador receptor projetado obteve resultados superiores do que o acoplador padrão (DOURADO, 2004).

Em 2009, ocorre a regulamentação da tecnologia PLC no Brasil. Isso devido a necessidade proveniente do surgimento e expansão de novas tecnologias que poderiam utilizar a rede elétrica, tais como TV, Internet, aplicações de automação predial e residencial (ANATEL, 2009).

Em 2010, Victor Zago Gomes Ferreira desenvolveu um trabalho em que abordou a domótica visando a melhoria da qualidade de vida dos portadores de deficiência. Neste trabalho, a transmissão de dados foi realizada utilizando-se a tecnologia PLC e foi constatado que o emprego desta é viável na domótica devido seu baixo custo e aplicabilidade nas residências já existentes (FERREIRA, 2010).

Já em 2015, a empresa D-Link Systems Inc. desenvolveu um equipamento de transmissão de internet por meio da rede elétrica. Este dispositivo utiliza o sinal de internet via cabo de rede e o transmite para outras tomadas existentes no ambiente, o que possibilita o acesso à internet pelas mesmas. Esse equipamento é denominado de *PowerLine AV2 2000 Gigabit Starter Kit* (modelo DHP-701AV) e suporta velocidade de até 2 Gbps (CONNECTED HOME WORLD, 2015).

Neste contexto, a tecnologia *Power Line Communication*, alvo deste trabalho, possui aplicações em diversas áreas e seu avanço tecnológico ao longo dos anos é evidente.

4- METODOLOGIA

4.1- Laboratórios

Os procedimentos para a realização deste estudo foram executados nos Laboratórios de Eletrônica e de Protótipos, localizados na instituição de ensino Centro Federal de Educação Tecnológica, Campus Divinópolis, Minas Gerais.

4.2- Softwares

Os softwares utilizados nas projeções e simulações dos circuitos foram: Arduino 1.0.6 (gratuito), GraphPad PrismTM (versão estudante), MATLAB R2014a (versão estudante), Proteus 8.0 (versão estudante).

4.3- Equipamentos

Os equipamentos e ferramentas empregados na implementação da proposta foram:

- Osciloscópio;
- Multímetro;
- Fonte de alimentação;
- Gerador de sinal;
- Ferro de solda;
- Cegueta;
- Furador de placa.

4.4- Materiais

Os materiais utilizados foram: componentes eletrônicos (resistores, capacitores de poliéster, amplificadores operacional, transistores, diodo, transformador, circuito integrado NE555), placas de fenolite, bornes, estanho, cabos, plugue macho, Arduino Mega 2560, motor de corrente contínua (motor CC).

Em relação ao amplificador operacional, esse foi um TL071. Isso por operar em frequências de 0 à aproximadamente 200 kHz, abrangendo a faixa necessária para o desenvolvimento deste trabalho (110 kHz). Além disso, o TL071 pode ser aplicado em um filtro passa-faixa (circuito resistivo-capacitivo-indutivo) devido sua aplicação na configuração de indutância de Antoniou, o qual possui comportamento semelhante ao de um indutor.

O motor CC, citado anteriormente, foi um motor de limpador de parabrisa de 12 V, o qual foi usado como carga do protótipo. Este motor foi escolhido por suas características já serem de conhecimento do autor.

Já em relação ao transistor, foi utilizado um TIP122 NPN, o qual foi empregado no driver de acionamento do motor CC. Isso devido suportar uma corrente contínua no coletor de até 5 A, superior à do motor alimentado com 12 V, a qual é de aproximadamente 2 A.

A respeito do transformador, foi usado o transformador 110 para 15 V (7:1) – 1,5 A. Esse foi empregado para promover um acoplamento indutivo.

A respeito do circuito integrado NE555, esse foi escolhido para a construção do oscilador devido possuir baixo custo e atender as necessidades do protótipo.

Por fim, a unidade microcontrolada foi um Arduino Mega 2560. O mesmo foi utilizado por já ser de domínio do autor.

4.5- Procedimentos

Inicialmente foi selecionada a frequência do sinal a ser acoplado na rede elétrica. A escolha da frequência foi baseada no padrão EN500065 da CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization), no qual os sistemas PLC podem operar na faixa de frequência de 3 kHz à 148,5 kHz. Essa faixa foi subdividida em subcategorias, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Subcategorias da faixa de frequência do padrão EN500065 da CENELEC.

Banda	Descrição
A	A faixa de 3-95 kHz requer uso de protocolo e é alocada para serviços públicos, como a leitura de medidores e controles automatizados de carga.
B	A faixa de 95-125 kHz não requer nenhum uso do protocolo de acesso para estabelecer comunicação. Assim, é possível que dois sistemas possam transmitir simultaneamente nesta faixa. Esta faixa é projetada para o uso de aplicações como monitores de bebês.
C	A faixa de C, de 125-140 kHz requer um protocolo de acesso. As aplicações para os dispositivos que operam nesta faixa podem ser a comunicação entre computadores de um edifício, automação predial e residencial, etc.
D	A faixa de 140-148,5 kHz é similar à faixa A, no entanto não é necessário uso de protocolo.

O presente trabalho não fará uso de protocolo de acesso para estabelecer comunicação, sendo assim, a banda B (faixa de frequência de 95-125 kHz) atenderá as expectativas.

Em seguida, foi determinada a impedância da rede elétrica, a qual de acordo com Dostert (1990) pode variar de 2Ω a 150Ω .

4.5.1- Protótipo inicial

O protótipo inicial projetado foi composto por gerador de sinais, acoplador capacitivo/indutivo e canal (rede elétrica). A configuração deste protótipo pode ser visualizada no diagrama de blocos na Figura 4.1.

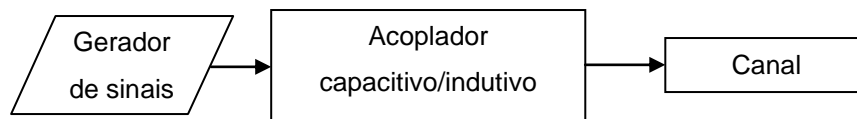


Figura 4.1 – Diagrama de blocos do protótipo inicial.

O princípio de funcionamento do protótipo inicial apresentado na Figura 4.1 consiste em: O gerador de sinais gera uma onda senoidal cuja tensão de pico é igual a 5 V com frequência de 110 kHz. Essa onda é aplicada em um capacitor, o qual é conectado em série entre o gerador de sinais e o secundário do transformador (15 V para 110 V). No primário do transformador (110 V para 15 V), foi inserida a rede elétrica, a qual tem sua tensão induzida no secundário com, aproximadamente, 15 V. Em relação ao capacitor, esse se comporta de forma diferente de acordo com a frequência aplicada no mesmo. Sendo assim, para tensões de altas frequências, como o sinal proveniente do gerador de sinais (110 kHz), o capacitor possui uma baixa impedância fazendo com que grande parte desta tensão seja aplicada no secundário do transformador, o qual induz no seu primário uma tensão, aproximadamente, sete vezes maior. Com isso, a onda proveniente do gerador de sinais é acoplada no canal. Já para tensões de baixas frequências, como no caso da tensão da rede elétrica (60 Hz), o capacitor possui alta impedância. Isso faz com que quase toda esta tensão fique sobre o capacitor, impedindo que ela seja injetada no gerador de sinais.

4.5.2- Projeto dos circuitos do protótipo inicial

Com a escolha da frequência do sinal, a qual é de 110 kHz, foram projetados e simulados – utilizando os *softwares* MATLAB R2014a (versão

estudante), Proteus 8.0 (versão estudante) – os circuitos que compõem o acoplador capacitivo/indutivo.

4.5.2.1- Acoplamento capacitivo/indutivo

O acoplador capacitivo/indutivo é composto por um transformador e um capacitor. No primário deste transformador foi conectada a rede elétrica. Já no secundário, foram conectados em série um capacitor de 470 nF e um gerador de sinais, respectivamente. O valor do capacitor foi determinado para possuir uma alta impedância para frequências baixas e baixa impedância para frequências altas. O esquema deste acoplador pode ser visto na Figura 4.2 abaixo.

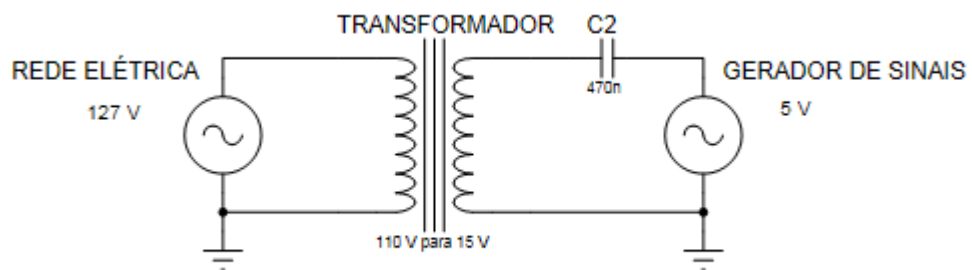


Figura 4.2– Acoplador indutivo/capacitivo.

Depois, o circuito acoplador apresentado anteriormente foi implementado como pode ser observado na Figura 4.3.

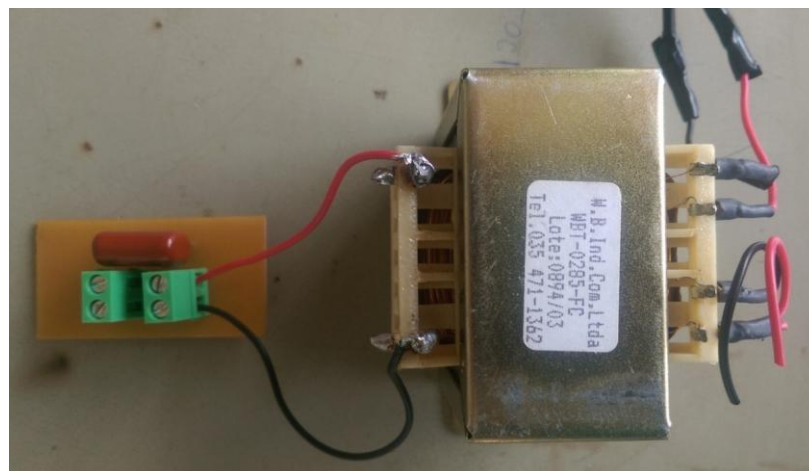


Figura 4.3 – Implementação do circuito acoplador indutivo/capacitivo.

Em seguida, foi realizado o projeto do protótipo final como é descrito a seguir.

4.5.3- Protótipo final

O protótipo final foi composto por: circuito oscilador, buffer, acoplador capacitivo/indutivo, canal (rede elétrica), circuito desacoplador (filtro passa-alta passivo, filtro passa-faixa ativo, amplificador não-inversor e optoacoplador), unidade microcontrolada, driver para acionamento da carga e a carga (motor CC). Sendo assim, foi necessário o projeto de todos os circuitos citados anteriormente com excessão do acoplador indutivo/capacitivo, uma vez que esse já foi implementado no protótipo inicial. A configuração do protótipo final pode ser visualizada no diagrama de blocos na Figura 4.4.

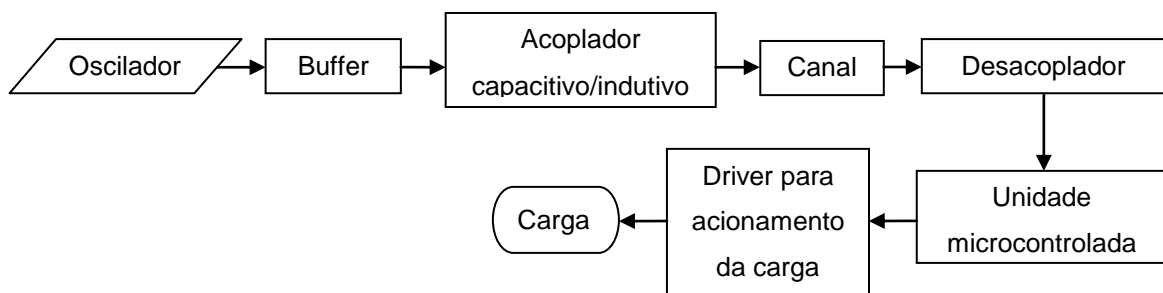


Figura 4.4 – Diagrama de blocos do protótipo final.

O princípio de funcionamento do protótipo final apresentado na Figura 4.4 consiste em: O circuito oscilador gera uma onda quadrada cuja tensão de pico é igual a 5 V com frequência de 110 kHz. Essa onda é aplicada em um capacitor, o qual é conectado em série entre o gerador de sinais e o secundário do transformador (15 V para 110 V). No primário do transformador (110 V para 15 V), foi inserida a rede elétrica, a qual tem sua tensão induzida no secundário com, aproximadamente, 15 V. Em relação ao capacitor, esse se comporta de forma diferente de acordo com a frequência aplicada no mesmo. Sendo assim, para tensões de altas frequências, como o sinal proveniente do gerador de sinais (110 kHz), o capacitor possui uma baixa impedância fazendo com que grande parte desta tensão seja aplicada no secundário do transformador, o qual induz no seu primário uma tensão, aproximadamente, sete vezes maior. Com isso, a onda proveniente do gerador de sinais é acoplada no canal. Já para tensões de baixas

frequências, como no caso da tensão da rede elétrica (60 Hz), o capacitor possui alta impedância. Isso faz com que quase toda esta tensão fique sobre o capacitor, impedindo que ela seja injetada no gerador de sinais.

Após isso, para desacoplar o sinal de 110 kHz da rede elétrica, ambas tensões são aplicadas em um filtro passa alta e, depois, em um filtro passa-faixa. Esses filtros atenuam a tensão do canal e de ruídos para aproximadamente 0 V, restando assim apenas o sinal acoplado. Em seguida, este sinal é aplicado em um amplificador não-inversor para garantir a fidelidade a onda quadrada gerada pelo circuito oscilador. Feito isso, esta onda é aplicada em um optoacoplador, o qual possui resposta lenta ao comparado a frequência da onda. Sendo assim, a saída do optoacoplador é o valor médio da tensão da onda quadrada, o qual é aplicado na entrada analógica de um microcontrolador. O microcontrolador gera um sinal PWM correspondente a tensão lida na entrada analógica. Por fim, o sinal PWM é aplicado no driver de acionamento da carga, que por sua vez aciona a carga.

4.5.3.1- Projeto dos circuitos do protótipo final

4.5.3.1.1- Oscilador

Em relação ao circuito oscilador, esse foi projetado para gerar uma onda quadrada. A configuração deste oscilador pode ser observado na Figura 4.5.

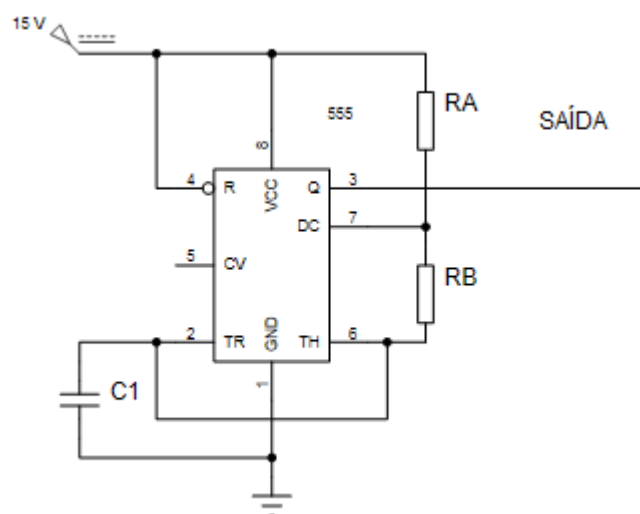


Figura 4.5 – Configuração do circuito oscilador.

Para se determinar os valores dos componentes presentes no oscilador, foram feitas as seguintes considerações: Frequência gerada (F_{gerada}), resistor (R_A) e capacitor (C) iguais à 110 kHz, 1 k Ω e 1 nF, respectivamente. Além disso, foi implementado um código (APÊNDICE A) com o software MATLAB. Com isso, e utilizando a Equação 4.1, foi possível calcular o valor do resistor R_B .

$$R_B = \frac{1.44}{2 * C * F_{gerada}} - \frac{R_A}{2} \quad (4.1)$$

O valor do resistor (R_B) é igual à, aproximadamente, 6 k Ω . Sendo assim, o oscilador obtido pode ser observado na Figura 4.6.

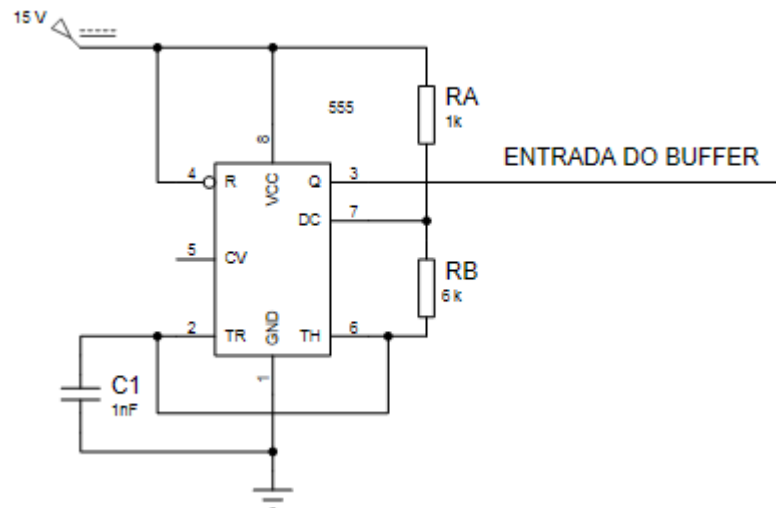


Figura 4.6 – Circuito oscilador projetado.

4.5.3.1.2- Buffer

No projeto do circuito buffer foi utilizado o amplificador TL071. Sendo assim, este circuito pode ser visualizado na Figura 4.7.

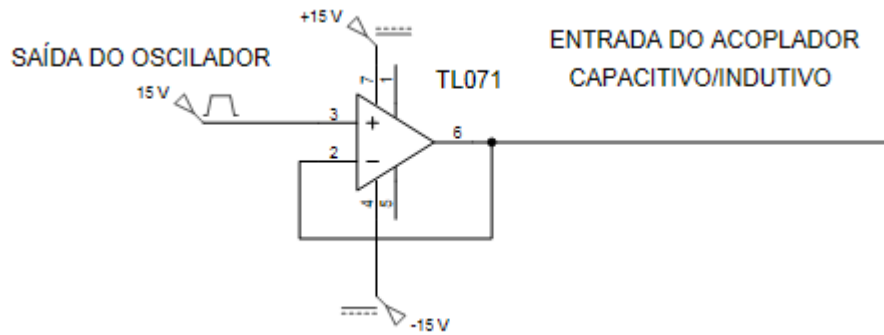


Figura 4.7 – Circuito buffer.

4.5.3.1.3- Desacoplamento

Para o desacoplamento do sinal de 110kHz foram projetados os circuitos passa alta passivo, passa-faixa ativo, amplificador não-inversor e optoacoplador, os quais estão conectados em série, respectivamente

4.5.3.1.3.1- Filtro passa alta

Em relação ao filtro passa alta passivo, o mesmo foi projetado para que a tensão da rede elétrica seja atenuada em 99,9%. Sendo assim, foi calculado, utilizando a Equação 4.2, o ganho que promoveria essa atenuação.

$$G = 20 * \log\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = 20 * \log\left(\frac{0,1*V_{in}}{100*V_{in}}\right) = -60 \frac{db}{dec} \quad (4.2)$$

O filtro que foi projetado é de primeira ordem sendo assim, possui atenuação de -20 db/dec. Como pretende-se atenuar a frequência de 60 Hz e o ganho calculado anteriormente foi de -60 db/dec, foi possível determinar a frequência de corte do filtro passa alta. Esta frequência deve estar três décadas acima da frequência da rede elétrica, ou seja, deve ser 60 kHz (F_{c1}). Utilizando este dado e atribuindo o valor do capacitor igual à 470 nF (C_3), foi calculado, com auxílio da ferramenta computacional MATLAB (APÊNDICE A), o valor do resistor usando a Equação 4.3.

$$R_1 = \frac{1}{2\pi * C_3 * F_{c1}} \quad (4.3)$$

O valor da resistência (R_1) é igual à, aproximadamente, 6.8Ω . Sendo assim, o filtro passa alta obtido pode ser observado na Figura 4.8.

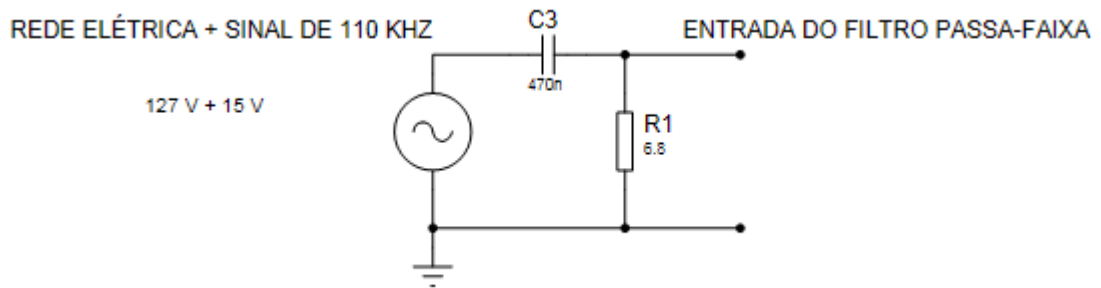


Figura 4.8 – Filtro passa alta passivo.

4.5.3.1.3.2- Filtro passa-faixa de segunda ordem

Para o projeto do filtro passa-faixa ativo (circuito RLC), foi escolhida uma frequência de corte central igual à 110 kHz (F_{C2}). Além disso, o indutor foi substituído por uma indutância de Antoniou, a qual simula o comportamento de um indutor. A configuração obtida para esse filtro pode ser visualizada na Figura 4.9.

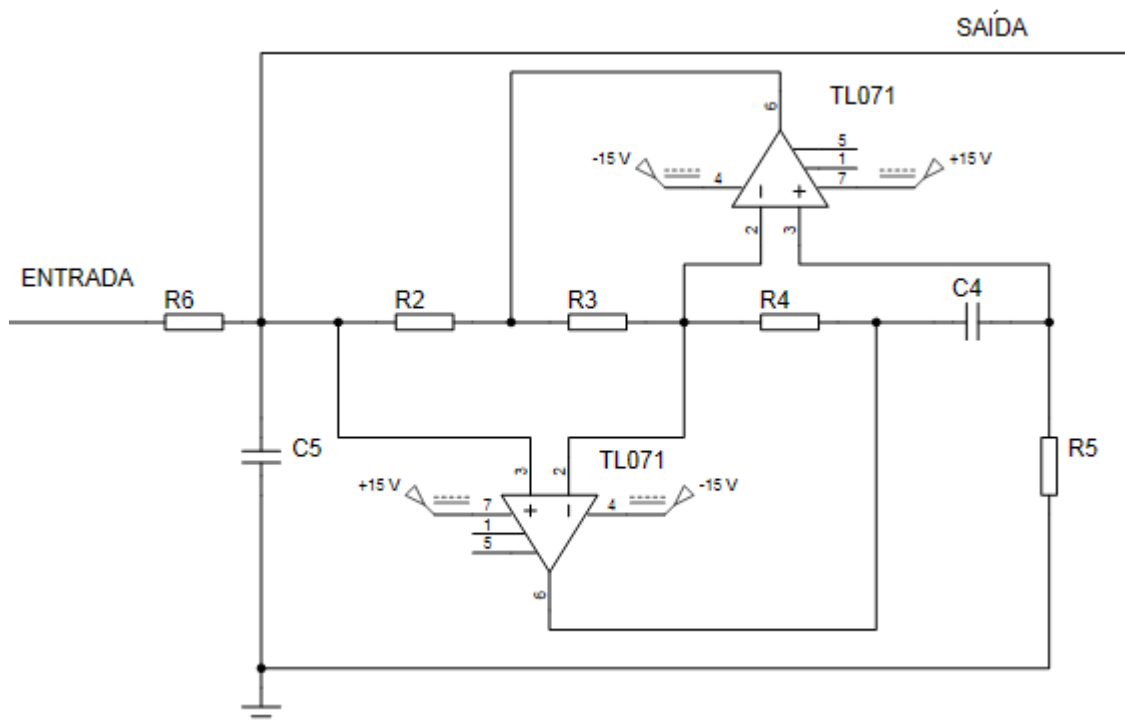


Figura 4.9 – Configuração do filtro passa-faixa de segunda ordem.

Para se calcular os valores dos componentes foram feitas as seguintes considerações: $R = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 1,5 \text{ k}\Omega$, $C = C_4 = C_5$ e $F_{c2} = 110 \text{ kHz}$. Sendo assim, utilizando o software MATLAB (APÊNDICE A) possível obter os valores dos capacitores por meio da Equação 4.4.

$$C = C_4 = C_5 = \frac{1}{2\pi * R * F_{c2}} \quad (4.4)$$

O valor dos capacitores é (C_4 e C_5) é igual à, aproximadamente, 1 nF . Sendo assim, o filtro passa-faixa obtido pode ser observado na Figura 4.10.

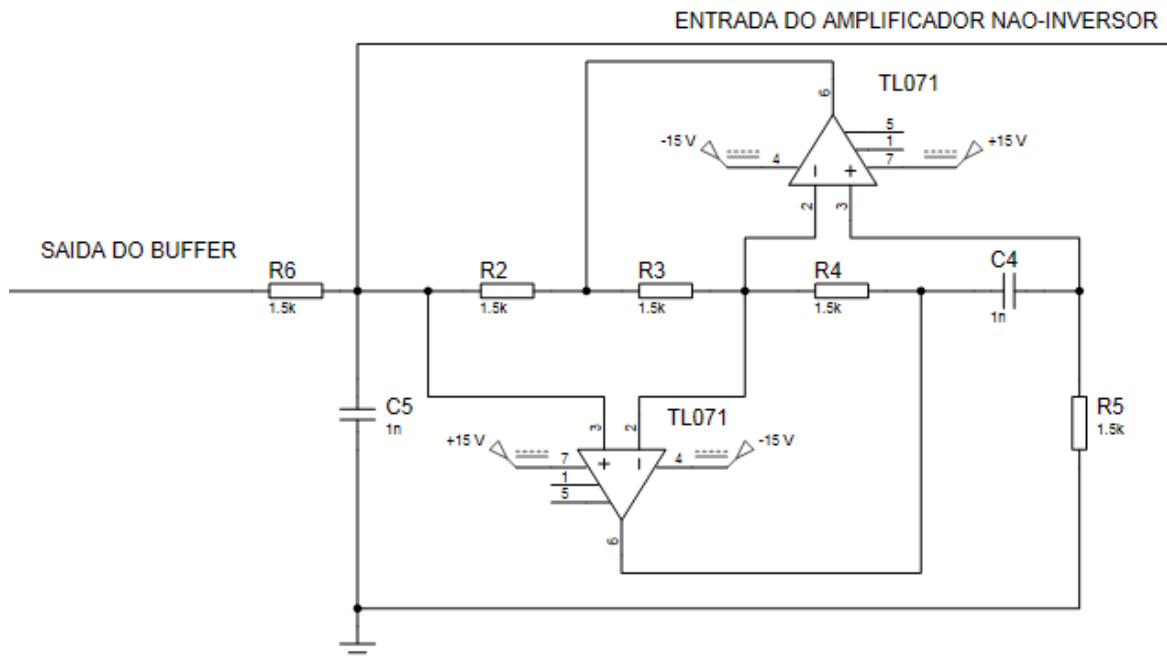


Figura 4.10 – Filtro passa-faixa de segunda ordem obtido.

4.5.3.1.3.3- Amplificador não-inversor

O amplificador não-inversor foi projetado para gerar um ganho (G) de 20 vezes no sinal proveniente do filtro passa-faixa. Com este ganho e considerando uma das resistências (R_7) igual à $10 \text{ k}\Omega$, foi possível calcular o valor de R_8 utilizando a Equação 4.5

$$R_8 = R_7 * G - R_7 \quad (4.5)$$

O valor do resistor (R_8) é igual à, aproximadamente, 200 k Ω . Sendo assim, o amplificador não-inversor obtido pode ser observado na Figura 4.11.

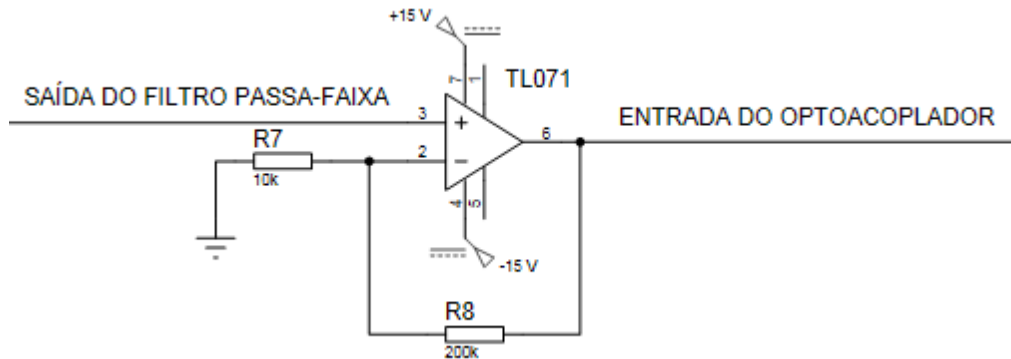


Figura 4.11 – Amplificador não-inversor projetado.

O circuito amplificador não-inversor projetado, bem como, os circuitos associados a este, serão testados posteriormente sendo e os seus resultados demonstrados na apresentação do presente estudo.

4.5.3.1.3.4- Optoacoplador

O circuito é composto por um optoacoplador, o qual foi escolhido para possuir resposta mais lenta que o sinal de 110 kHz. Isso para que a saída do optoacoplador seja a tensão média deste sinal. Sendo assim, o circuito optoacoplador pode ser visualizado na Figura 4.12.

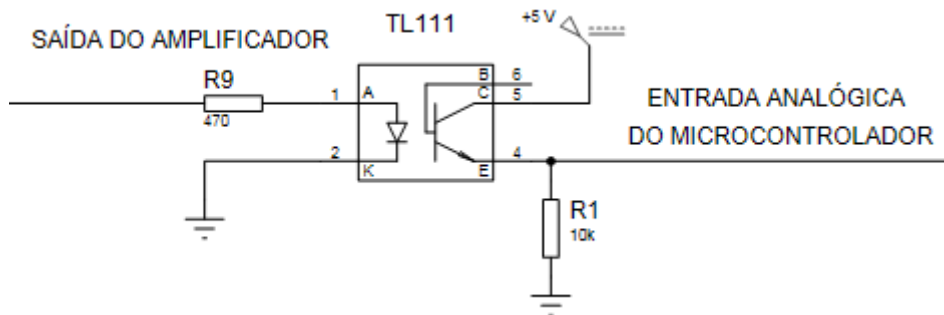


Figura 4.12 – Circuito optoacoplador.

Até o presente momento foi iniciada a implementação do circuito optoacoplador, sendo assim, os resultados relacionados com este serão demonstrados posteriormente na apresentação deste trabalho.

4.5.3.1.4- Unidade microcontrolada

A unidade microcontrolada foi composta por um Arduino Mega 2560. Esse é apresentado na Figura 4.13.

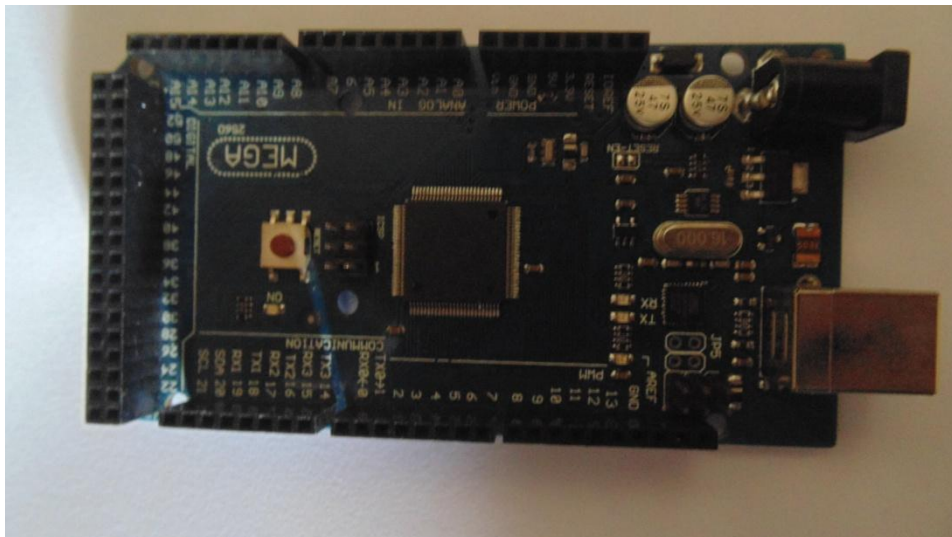


Figura 4.13 – Unidade microcontrolada (Arduino Mega 2560).

4.5.3.1.5- Driver para acionamento de um motor CC

No projeto do driver foram utilizados o transistor TIP122 NPN, um diodo N14148 (diodo de roda livre) e um resistor na base do transistor. Este resistor foi calculado com o auxílio do *software* Matlab (APÊNDICE A) e possui valor igual à aproximadamente 1 k Ω . Com o cálculo do resistor foi possível implementar o driver no ambiente computacional Proteus, como pode ser visualizado na Figura 4.14.

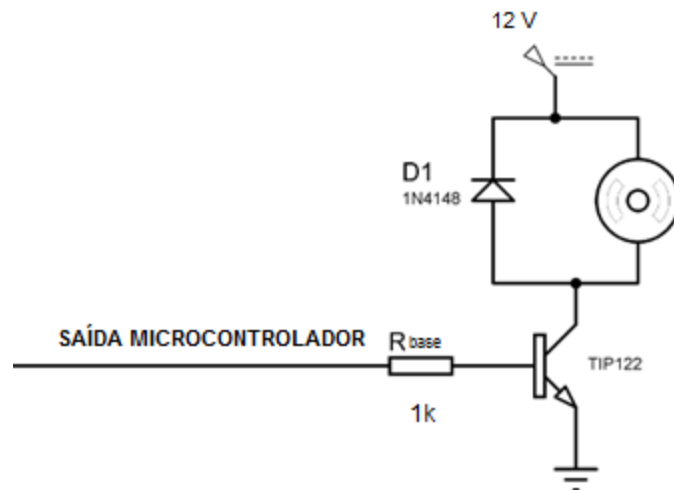
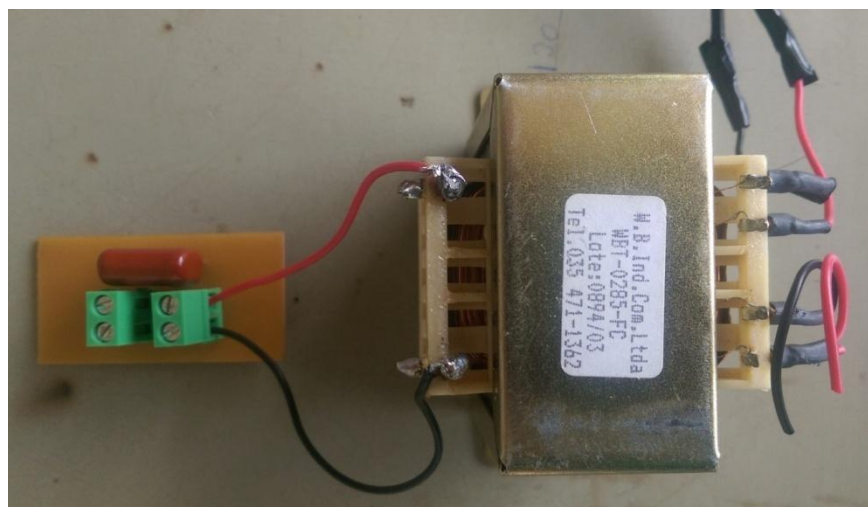


Figura 4.14- Driver para acionamento de um motor CC.

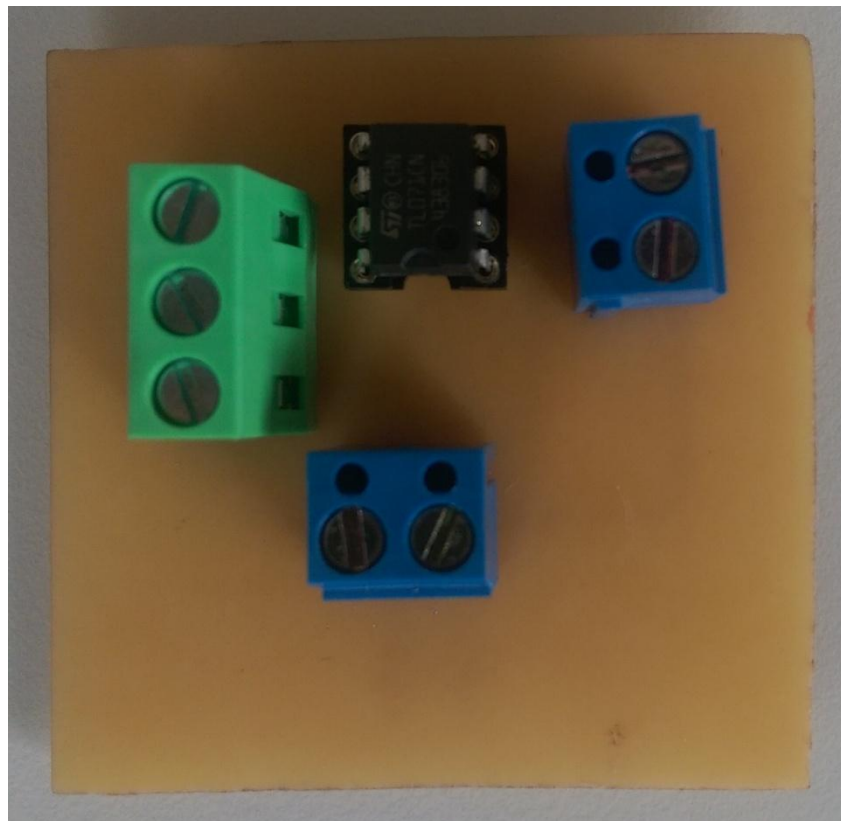
Depois, os circuitos apresentados anteriormente foram implementados, com exceção do optoacoplador, como pode ser observado na Figura 4.15.



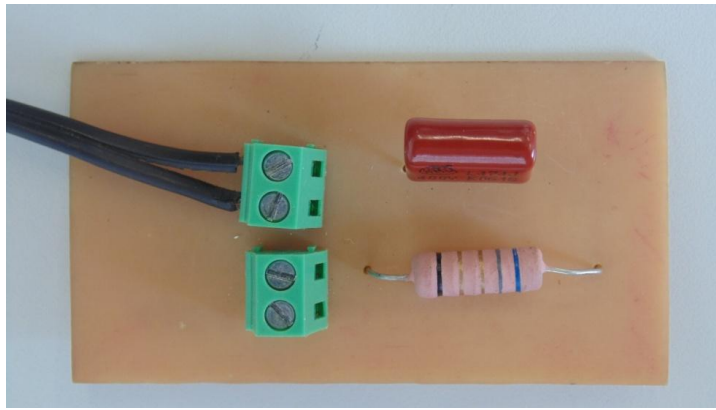
(a)



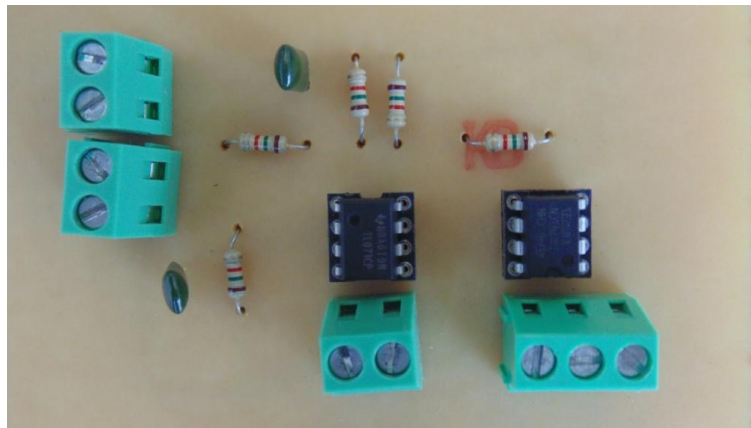
(b)



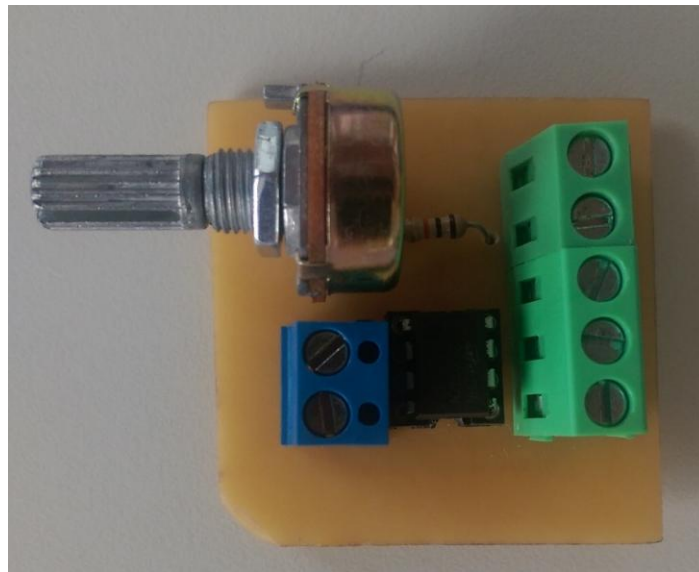
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.15 – Implementação dos circuitos projetados: (a) Acoplador capacitivo/indutivo; (b) oscilador; (c) buffer; (d) filtro passa alta passivo; (e) filtro passa-faixa ativo; (f) amplificador não-inversor.

5.5.2.3- Programação da unidade microcontrolada

A programação do Arduino Mega 2560 (microcontrolador Atmega2560) foi realizada em linguagem Arduino, implementada e gravada no microcontrolador utilizando o *software* Arduino 1.0.6 (gratuito).

O princípio de funcionamento do código (APÊNDICE B) consiste em: o microcontrolador lê a tensão média, proveniente do optoacoplador, em uma de suas entradas analógicas. Em seguida, por meio desta tensão é possível determinar a porcentagem do *duty cycle* do sinal PWM, o qual, juntamente com um *driver* para acionamento de carga, permitem o acionamento e variação da velocidade do motor CC (carga). A lógica do código implementado pode ser observada no fluxograma, apresentado na Figura 4.16.

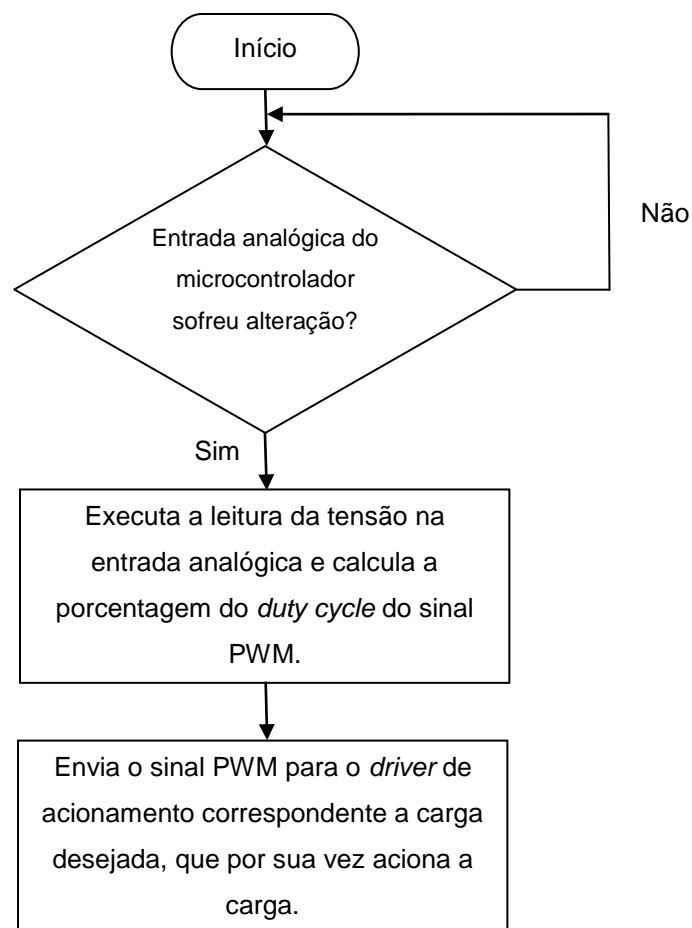


Figura 4.16- Fluxograma do código para controle de potência de cargas.

5.5.2.3- Análises estatísticas

Os orçamentos dos métodos de transmissão de dados sem fio (ZigBee, Wifi, Bluetooth, módulo NRF 24L01) e do sistema proposto no presente trabalho foram expressos como média. Em relação aos custos financeiros destes, a significância estatística entre estes foi avaliada por análise de variância simples (*one-way ANOVA*) seguido do pós-teste para múltiplas comparações Bonferroni. Foi utilizado o *software* GraphPad Prism™ versão 5.01, sendo consideradas significativas as diferenças ao nível de no mínimo $p < 0,05$.

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – Protótipo Inicial

O protótipo inicial foi implementado e testado. A Figura 5.1 mostra o sinal sendo acoplado na rede elétrica.



Figura 5.1 – Protótipo inicial: Sinal proveniente do gerador de sinais acoplado na rede elétrica.

Na Figura 5.1 pode-se perceber que a tensão do sinal acoplado na rede elétrica possui, aproximadamente, uma tensão de pico de 500 mV.

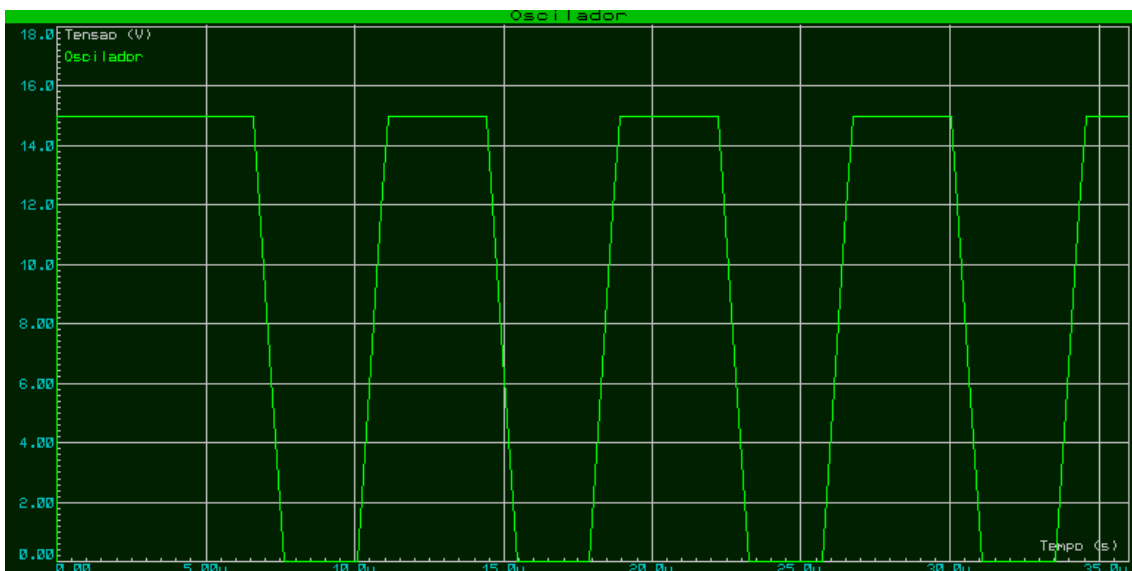
Em seguida, foram realizadas simulações e testes no protótipo final, os quais são descritos no tópico subsequente.

5.2 – Protótipo final

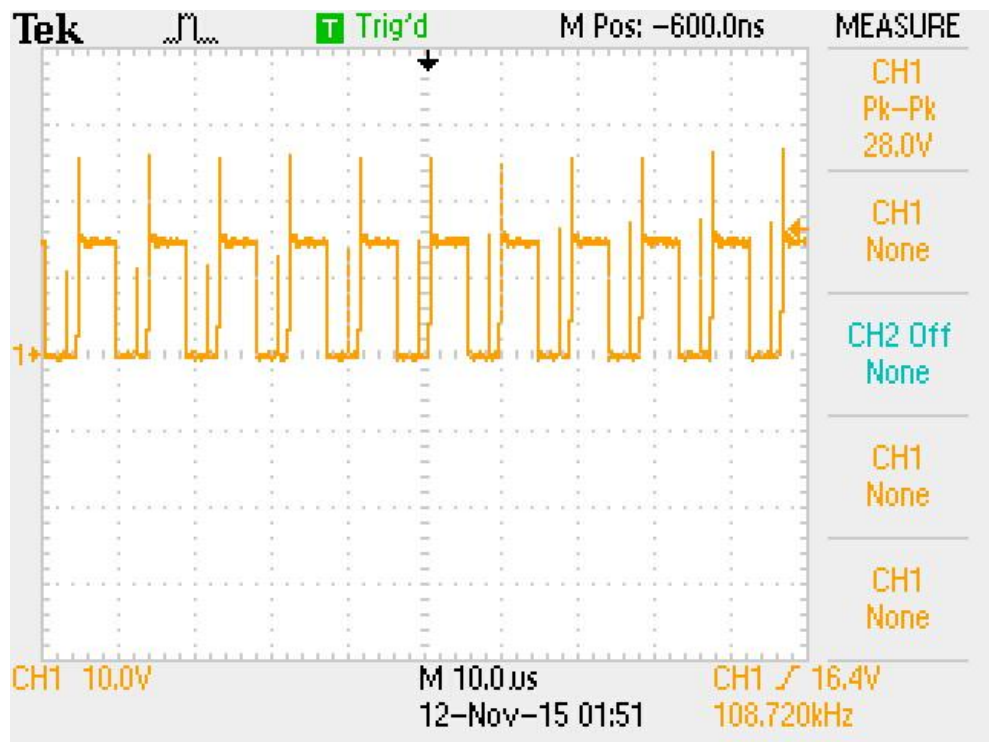
O protótipo final, assim como os circuitos que o compõe, foram simulados, implementados e testados. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

5.2.1 - Oscilador

As Figura 5.2 a e b demonstram, respectivamente, as respostas do circuito oscilador obtidos na simulação e teste para uma tensão de entrada igual a 15 V.



(a)



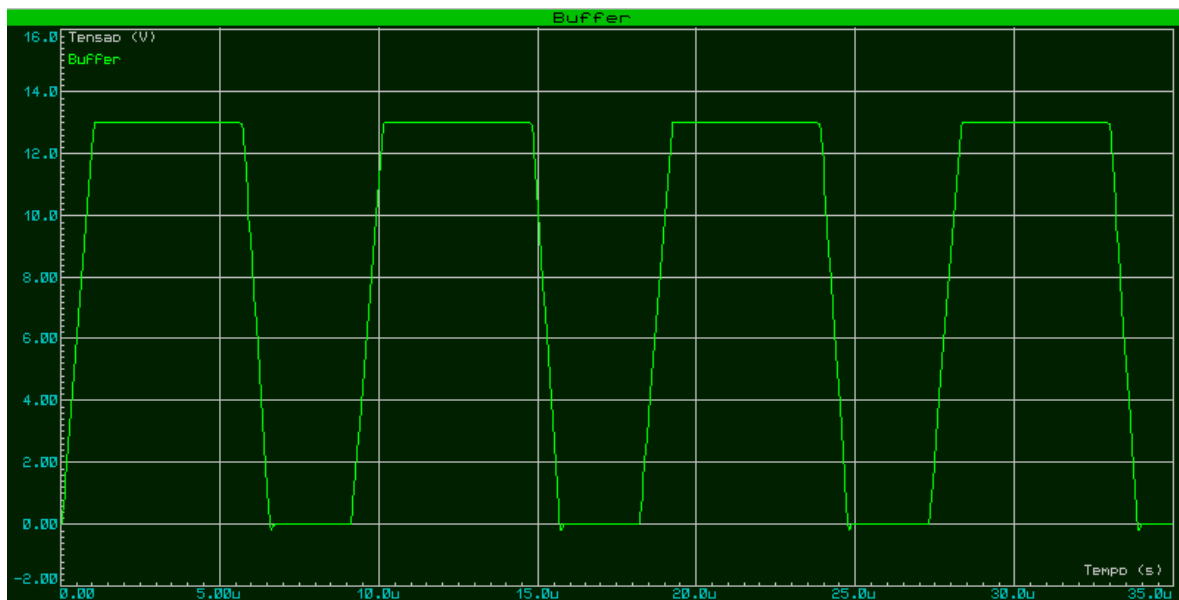
(b)

Figura 5.2 – Oscilador: (a) Simulação do oscilador para 15 V; (b) teste com o oscilador para 15 V.

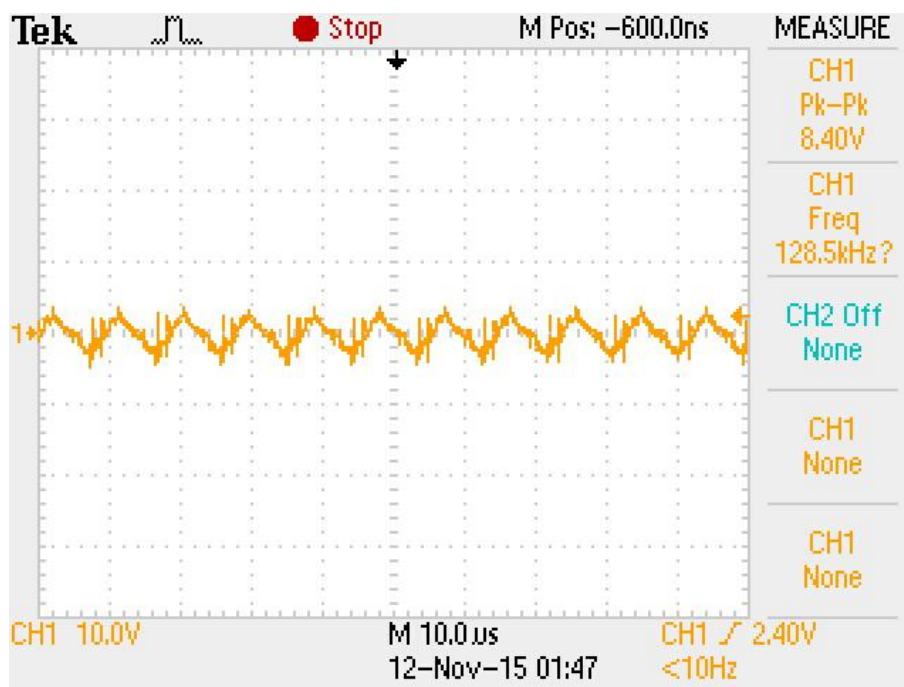
Nas Figura 5.2 a e 5.2 b é possível constatar que a resposta do circuito oscilador simulado é semelhante à obtida no teste. Ambos osciladores (simulado e implementado) geram uma onda quadrada com tensão de pico igual à 15 V, frequência de 110 kHz e *duty cycle* de aproximadamente 50%. No entanto, o oscilador implementado apresentou um *ripple* de aproximadamente 14 V devido ao estado transitório deste circuito.

5.2.2 – Buffer

As Figuras 5.3 a e b demonstram, respectivamente, as respostas do circuito buffer obtidos na simulação e teste para a onda quadrada de 15 V de pico com frequência de 110 kHz proveniente do oscilador.



(a)



(b)

Figura 5.3 – Buffer: (a) Simulação do buffer; (b) teste do buffer.

Nas Figuras 5.3 a e b é possível constatar que a resposta do buffer simulado é diferente da obtida no teste. Essa diferença ocorre devido a interferência proveniente das impedâncias dos circuitos subsequentes ao buffer, o que ocasiona na redução da tensão, de 15 para aproximadamente 3 V.

5.2.3 – Acoplador capacitivo/indutivo

A tensão de saída do buffer é aplicada no acoplador capacitivo/indutivo, o qual possui sua resposta, sem estar conectado a rede elétrica, apresentada na Figura 5.4.

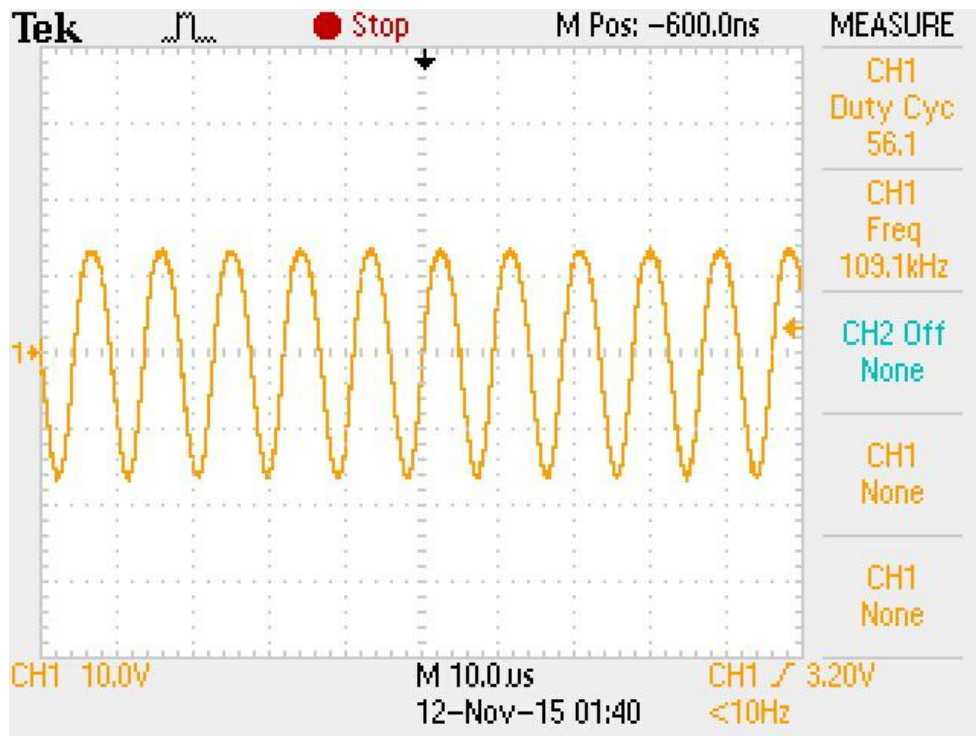


Figura 5.4- Resposta do acoplador capacitivo/indutivo sem estar conectado a rede elétrica.

A Figura 5.4 mostra que a tensão de saída do buffer, ao passar pelo acoplador capacitivo/indutivo, recebe um ganho de aproximadamente 6 vezes devido esta tensão ser aplicada nos terminais secundários do transformador (15 V para 110 V).

Para verificar a acoplagem do sinal de 110 kHz no canal, foi utilizada a função FFT (*Fast Fourier Transform*) presente no osciloscópio. O resultado obtido pode ser visualizado na Figura 5.5.

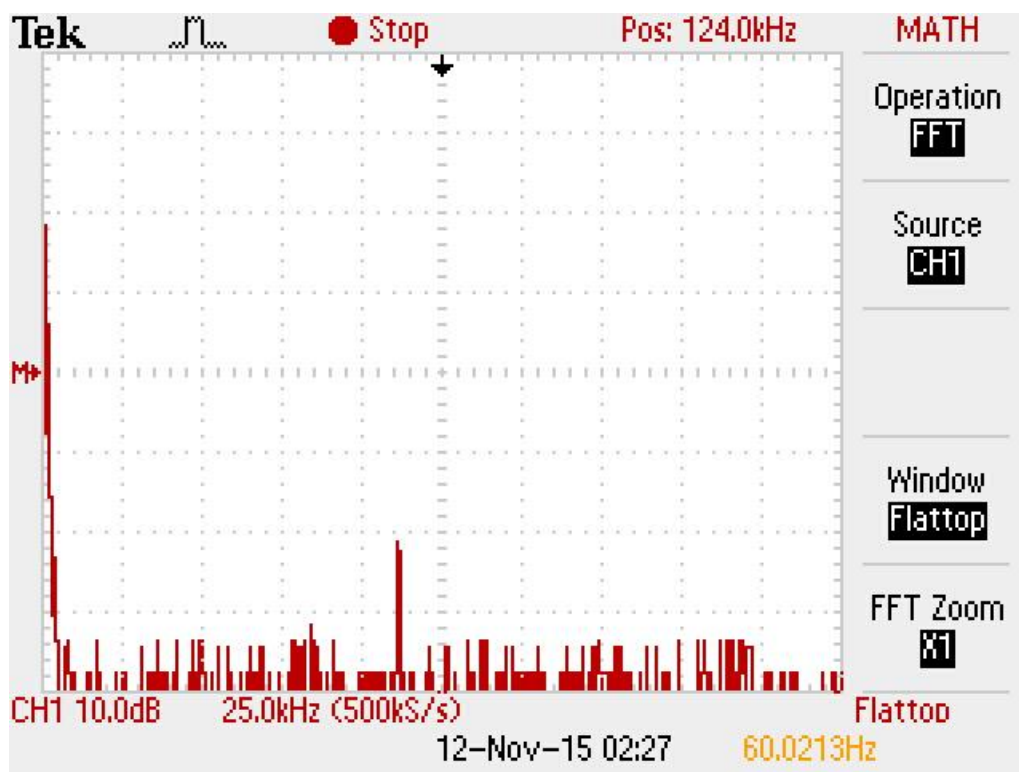


Figura 5.5 – Acoplagem do sinal de 110 kHz na rede elétrica.

Na Figura 5.5 é possível observar os espectros presentes na rede elétrica, sendo o eixo das ordenadas a amplitude e das abscissas a frequência dos mesmos. Nesta figura pode-se destacar dois espectros com ganho superior aos outros. O primeiro está localizado próximo à 0 Hz, o qual corresponde a rede elétrica (60 Hz) e possui amplitude de aproximadamente 60 dB. O outro espectro está presente próxima a frequência de 110 kHz, este é respectivo ao sinal de 15 V acoplado ao canal e possui amplitude de aproximadamente 20 dB.

A Figura 5.6 mostra os espectros presentes na rede elétrica ao se efetuar a medição destes à uma distância de aproximadamente 2 metros do ponto de acoplagem do sinal.

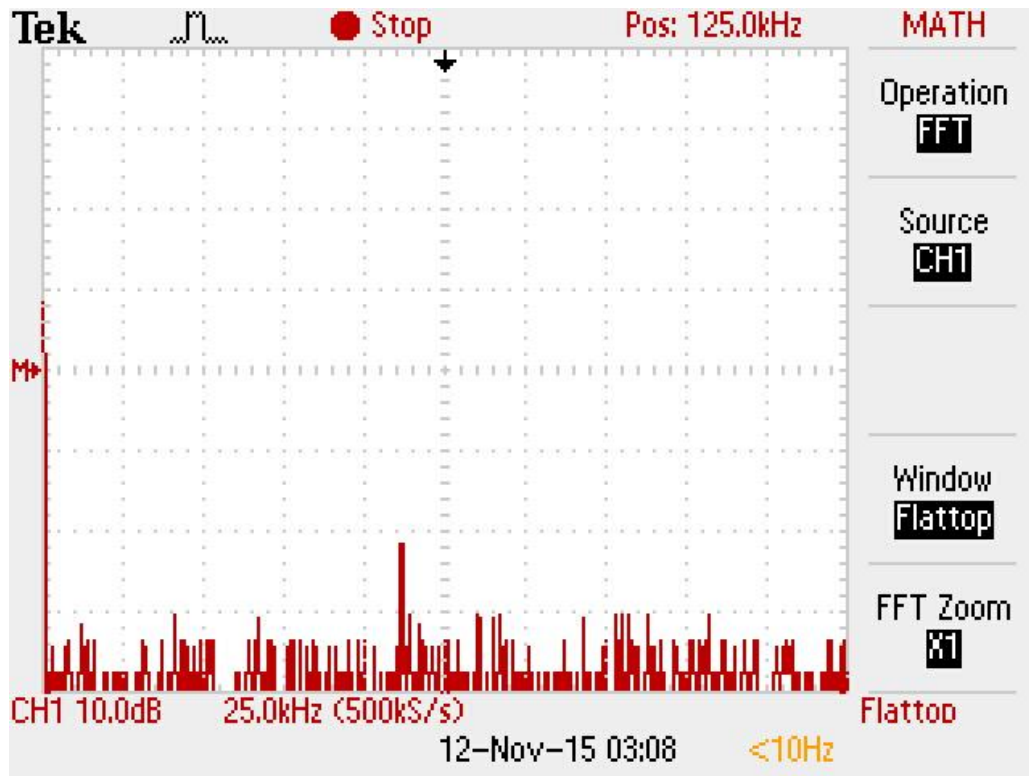


Figura 5.6 – Análise de espectros do sinal injetado no canal à um distância de 2 metros do ponto de acoplagem do mesmo.

5.2.4 – Filtro passa alta passivo

Utilizando a Equação 5.1 no *software* MATLAB (APÊNDICE A) foi possível determinar a função de transferência do filtro passa alta passivo.

$$FT = \frac{s \cdot R_1 \cdot C_3}{s \cdot R_1 \cdot C_3 + 1} \quad (5.1)$$

Sendo R_1 e C_3 iguais à $6,8 \Omega$ e 470 nF , respectivamente.

Com a função de transferência foi obtida a curva de Bode (Magnitude – dB) que pode ser visualizada na Figura 5.7.

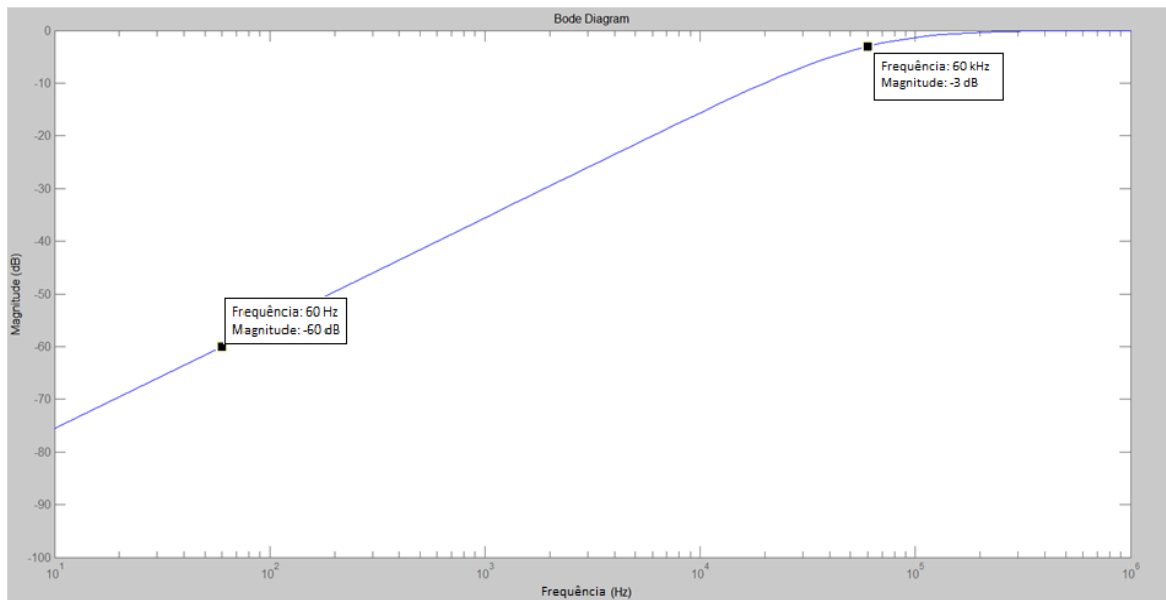
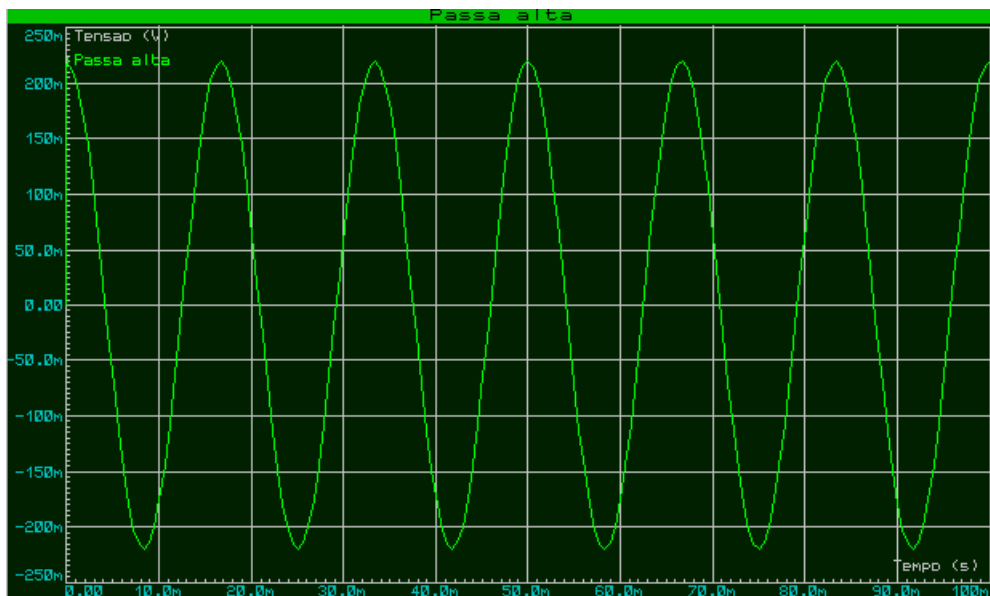
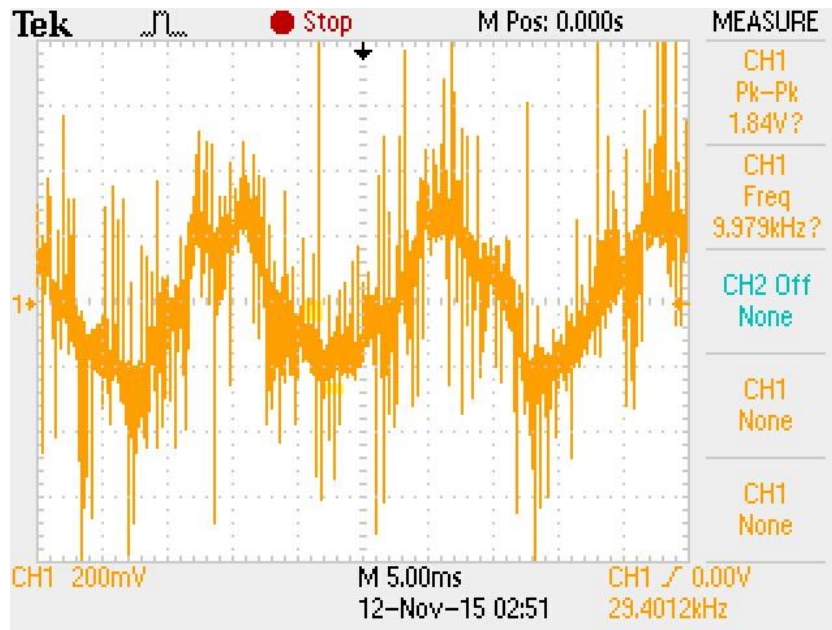


Figura 5.7 - Gráfico de Bode do filtro passa alta passivo.

Na Figura 5.7 pode-se constatar que as frequências abaixo de 60 kHz, ou seja, os ruídos abaixo dessa frequência e a tensão da rede serão atenuados. A última será atenuada em -60 dB, fazendo com que a tensão seja reduzida para 0,1% de seu valor inicial, ou seja, aproximadamente 180 mV. Isso pode ser verificado nas Figura 5.8 a e b, as quais demonstram a resposta do filtro passa alta na simulação e no teste, considerando sua entrada somente a rede elétrica.



(a)



(b)

Figura 5.8- Filtro passa alta: (a) Simulação; (b) teste.

As Figuras 5.8 a e b mostram que a resposta do filtro tanto na simulação quanto no teste, possuem resposta semelhante, ou seja, atenuaram a tensão da rede elétrica para aproximadamente 0,01% do seu valor de entrada.

5.2.5 – Filtro passa faixa

A Figura 5.9 demonstra a resposta do filtro passa faixa, sendo sua entrada as tensões da rede elétrica e do sinal de 110 kHz.

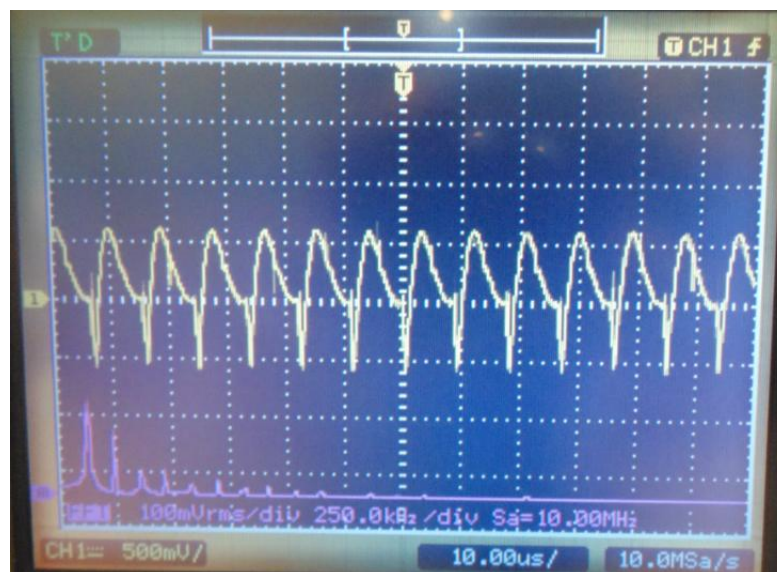


Figura 5.9 – Resposta do filtro passa faixa.

Na Figura 5.9 é possível constatar que a tensão da rede elétrica foi atenuada restando apenas o sinal de 110 kHz acoplado na mesma. Este sinal possui tensão de pico de aproximadamente 500 mV.

5.2.6 – Análise da viabilidade financeira do sistema PLC

Os valores médios dos custos financeiros dos métodos PLC, WiFi, ZigBee, módulo NRF 24L01 e bluetooth, obtidos dos orçamentos realizados em três empresas são demonstrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Orçamento dos métodos de transmissão de dados (PLC, WiFi, ZigBee, módulo NRF 24L01 e bluetooth).

Sistema	Valor médio
PLC	295,46
ZigBee	618,61
Bluetooth	411,17
WiFi	390,99
NRF 24L01	236,66

Considerando o custo financeiro para implementar todos estes métodos pode-se verificar que o menos oneroso foi o NRF 24L01 e o com maior custo foi o ZigBee. Há diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,001$) nos custos destes sistemas de transmissão de dados, podendo ser verificada uma escala do menor para o maior investimento financeiro:

$$\text{NRF 24L01} < \text{PLC} < \text{WiFi} < \text{Bluetooth} < \text{ZigBee}.$$

É importante destacar que o sistema de transmissão proposto (PLC) é o segundo de menor custo.

6- CONCLUSÕES

Um dos achados importantes deste trabalho é a atenuação significativa do sinal acoplado, sendo que o sinal injetado possuía tensão de pico igual à 15 V e ao ser desacoplado, apenas 500 mV.

Em relação ao custo financeiro, o presente estudo demonstra a viabilidade da implementação do *Power Line Communication* como sistema de transmissão de dados, sendo este o segundo sistema menos oneroso se comparado com os demais métodos (WiFi, ZigBee, módulo NRF 24L01 e bluetooth).

Além disso, o presente estudo demonstra a importância do desenvolvimento de trabalhos futuros que investiguem a implementação e testes de sistemas de transmissão de dados diferentes dos que são empregados convencionalmente.

7- PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando as etapas já executadas, pode-se apontar como possíveis trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de um painel com fonte de alimentação variável, oscilador, botoeiras e microcontrolador. Em relação a fonte, essa poderá ser utilizada para alterar a amplitude do sinal gerado pelo oscilador. Esta alteração da amplitude permitirá variar a potência entregue a carga por meio de um código implementado no microcontrolador presente após o circuito desacoplador. Já a respeito das botoeira, elas permitirão, em conjunto com o microcontrolador do painel, acionar a carga correspondente a botoeira pressionada;
- Redução de custos e dimensões do sistema desenvolvido por meio da unificação dos circuitos presentes no acoplamento e desacoplamento;
- Implementação de um protocolo de comunicação.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **PLC: Internet pela rede elétrica.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/hotsite/plc/>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações. **Resolução 527.** Brasília, DF, 2009. 13 p.

ARDUINO. **PWM.** Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>>. Acesso em: 04 jul. 2015.

ARDUINO². **Referência de Linguagem.** Disponível em: <<http://playground.arduino.cc/Portugues/Referencia>> . Acesso em: 09 abr. 2015.

BOJORGE. N. **Função de transferência.** Disponível em: <http://www.professores.uff.br/controldeprocessos-eq/images/stories/Control_Aula05_1sem2013.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2015.

CONNECTED HOME WORLD. **New D-Link AV2 2000 Gigabit Powerline Adapter, Due Next Month.** Disponível em: <<http://www.connectedhomeworld.com/content/new-d-link-av2-2000-gigabit-powerline-adapter-due-next-month>>. Acesso em: 02 jul. 2015.

CURSOS PROFISSIONAIS E CEF 2008/2009. **Transmissão digital.** Disponível em: <<http://clientes.netvisao.pt/jomasole/transmissao.htm>>. Acesso em: 24 mar. 2015.

DOSTERT, K. M. Frequency-hopping spread-spectrum modulation for digital communications over electrical power lines, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 9, n. 3, p. 700-710, 1990.

DOURADO, A. **Acopladores em sistemas de comunicação de dados pela rede elétrica.** 2004. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Universitário de Brasília, Brasília – DF, 2004.

ELETRONICSTUTORIALS. **Active band pass filter**. Disponível em: <http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_7.html>. Acesso em: 20 maio de 2015.

FARIA, J. L. Domótica: Versatilidade de implementação e as suas vantagens. **Neutro à terra**, Porto, n. 8, p. 53-58, dez. 2011.

FERREIRA, V. Z. G. **A domótica como instrumento para a melhoria da qualidade de vida dos portadores de deficiência**. 2010. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2010.

FILIPEFLOP. **NRF24L01 wireless transceiver 2,4GHz**. Disponível em: <<http://www.filipeflop.com/pd-80d63-nrf24l01-wireless-transceiver-2-4ghz.html>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

FRITZING. **Nordic NRF24L01 wireless transmitter-receiver**. Disponível em: <<http://fritzing.org/forum/thread/1503/>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

GUNGOR, V. C. LAMBERT, F. C. A survey on communication networks for electric system automation. **Computer Networks**, v. 50, p. 877-897, 2006.

HAARTSEN, J. Bluetooth – the universal radio interface for ad hoc, wireless connectivity. **Ericsson Review**, Sweden, v. 75, n. 3, p. 110-117, 1998.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sinopse do censo demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=P13&uf=00>>. Acesso em: 17 mar. 2015.

JUNIOR, N. A. SILVA, S. L. P. **Introdução as redes wireless**. Disponível em: <<http://mesonpi.cat.cbpf.br/redes/wireless.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2015.

LANDIM, W. **O que é Wi-Fi?**. Disponível em:<<http://www.tecmundo.com.br/wi-fi/197-o-que-e-wi-fi-.htm>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

MCDERMOTT-WELSS, P. What is bluetooth?. **IEEE Potentials**, v. 23, n. 5, p. 33-35, 2004-2005.

MONSIGNORE, F. **Sensoriamento de ambiente utilizando o padrão ZigBee**. 2007. 92 f. Dissertação para obtenção do título de mestre, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MULTILÓGICA SHOP. **Arduino Mega 2560**. Disponível em: <<https://multilogica-shop.com/arduino-mega2560>>. Acesso em: 09 abr. 2015.

OFICINA DA NET. **Diferença entre wireless, WiFi e Bluetooth**. Disponível em:<http://www.oficinadanet.com.br/artigo/1881/diferenca_entre_wireless_wi-fi_e_bluetooth>. Acesso em: 26 mar. 2015.

OLIVEIRA. B. Q, LÚCIO. B. M e Neto. J. L. F. **Diagrama de Bode**. 2009. 2 f. Relatório de Pesquisa, Universidade Católica de Goiás, 2009.

PERUSSI, J. **Comunicação de áudio entre dois pontos através da rede de energia elétrica**. 2013. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ROSA, M. **Monitoramento de temperatura do motor de aerogeradores de pequeno porte utilizando Power Line Communication – PLC**. 2012. 101 f. Dissertação para obtenção do título de mestre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SANTOS, T. L. **Power Line Communication**. Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/tulio/Historico.htm>. Acesso em: 21 mar. 2015.

SILVEIRA, R. S. RIBEIRO, V. G. MARTINS, M. M. Uma solução de baixo custo para implementação de domótica. **Revista de sistemas e computação**, Salvador, v. 4, n. 2, p. 126-133, 2014.

STREETON, M. STANFIELD, C. **Zigbee: the telemetry solution?** In: The IEE Seminar on Telemetry and Telematics, 2005, Savoy Place, London, UK, p. 8.

TEXAS INSTRUMENTS. **Smart grid & energy solutions guide**. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 2015. 25 p.

VARGAS, A. A. et al. **Comunicação de dados através da rede elétrica**. 2004. 70 f. Relatório de Pesquisa, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

APÊNDICE A

%Código implementado no matlab para projeto dos circuitos oscilado, filtro passa
%faixa, filtro alta e driver para acionamento de um motor CC.

% Oscilador LM555

clc

Fgerada = 110e3;

C1 = 1e-9;

Ra = 1e3;

Rb = (1.44)/(Fgerada*C1*2)-Ra/2

%% Filtro passa-faixa - Antoniou inductor

clc

Fc2 = 110e3

R = 1.5e3 %R2,R3,R4,R5,R6

C = 1/(R*2*pi*Fc2)

%% Filtro passa-alta

clc

Fc1 = 60e3; %Frequência de corte calculada - vide memoria de calculo

C3 = 470e-9; %Capacitor - valor escolhido

R1 = 1/(2*pi*C3*Fc1) %Resistor (56 + 750 - valores comerciais)

num = [R1*C3 0]

den = [R1*C3 1]

FT = tf(num,den)

bodemag(FT)

%% Driver para acionamento de um motor CC.

$V_{base} = 5$; %Tensão de entrada na base do transistor.

$V_{be} = 0.7$; %Tensão de queda .

$\beta = 1000$; %Ganho de corrente.

$I_c = 2$; %Corrente máxima utilizada pelo motor CC.

$I_b = I_c / \beta$ %Corrente de base.

$R_{base} = (V_{base} - V_{be}) / (I_b * 2)$ %Resistor de base do TIP122

APÊNDICE B

```
int TensaoOpto= A0; // Pino de entrada do optoacoplador
int TensaoMedia =0; // Valor para armazenar a tensão lida pela entrada
analógica
int SaidaPWM = 5; // Pino para enviar PWM
int PorcentagemPWM = 0; //Porcentagem do PWM

void setup() {
  pinMode(SaidaPWM, OUTPUT);
}

void loop() {

  TensaoMedia = analogRead(TensaoOpto); // Lê a tensão proveniente do
//optoacoplador em bits
  TensaoMedia = TensaoMedia*5/1023; //Converte a tensão de bits para volts
  PorcentagemPWM = TensaoMedia*100/5; //Porcentagem do sinal PWM gerado
//(duty cycle)
  analogWrite(SaidaPWM, 255*PorcentagemPWM); //Envia o sinal PWM para a
//carga
```