

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
FATEC SANTO ANDRÉ**

Tecnologia em Mecatrônica Industrial

**VINÍCIUS DA SILVA MORAES
VITOR MARDEGAN ARAÚJO**

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
FATEC SANTO ANDRÉ**

Tecnologia em Mecatrônica Industrial

VINÍCIUS DA SILVA MORAES

VITOR MARDEGAN ARAÚJO

**ESTABILIZADOR DE TENSÃO ALTERNADA COM CONTROLE
POR DEGRAU OU “TAP CHANGER”**

Trabalho de Conclusão de Curso
entregue à Fatec Santo André como
requisito parcial para obtenção do
título de Tecnólogo em Mecatrônica
Industrial

Orientador: Prof. Me. Luiz Vasco Puglia

Santo André
2018

FICHA CATALOGRÁFICA

M827e

Moraes, Vinícius da Silva
Estabilizador de tensão alternada com controle por degrau ou
“tap changer” / Vinícius da Silva Moraes, Vitor Mardegan Araújo.
- Santo André, 2018. – 62f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, 2018.

Orientador: Prof. Luiz Vasco Puglia

1. Mecatrônica. 2. Regulador de tensão CA/CA. 3. Estabilizador.
4. Controle por degrau de tensão. 5. Tecnologia. 6. Tiristor. 7.
Acionamento elétrico. 8. Economia de energia. I. Araújo, Vitor
Mardegan. II. Estabilizador de tensão alternada com controle por
degrau ou “tap changer”

629.8

LISTA DE PRESENÇA

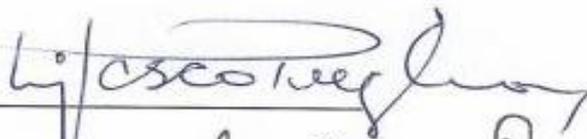
Santo André, 12 de Dezembro de 2018

**LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA:
“ESTABILIZADOR DE TENSÃO ALTERNADA COM CONTROLE POR
DEGRAU OU TAP CHANGER”
DOS ALUNOS DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.**

BANCA

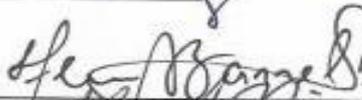
PRESIDENTE:

PROF. LUIZ VASCO PUGLIA



MEMBROS:

PROF. FLÁVIO AUGUSTO BARRELLA



PROF. FLÁVIO JOSÉ BENTO BATISTA

**ALUNOS :**

VINÍCIUS DA SILVA MORAES



VITOR MARDEGAN ARAÚJO



AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaríamos de agradecer a Deus por ter nos dado saúde e força para superar todas as dificuldades.

A você, que lendo este trabalho, compartilha conosco o resultado de muita doação e esforço.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que deram todo o suporte para que pudéssemos ter um curso com qualidade, em um ambiente agradável e viver diversas experiências marcantes em nossas vidas.

Ao nosso orientador Prof. Luiz Vasco Puglia, por ter nos apresentado a ideia de desenvolver esse projeto, dando todo suporte nas pesquisas e desenvolvimento, e nos momentos de maiores angústias e dificuldades, nos deu uma tranquilidade para que realizássemos o trabalho, sempre acreditando e incentivando-nos a concluir o mais rápido e com a maior qualidade possível.

A todos os professores que tivemos por nos proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a nós. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os nossos eternos agradecimentos.

Aos nossos familiares, por estarem sempre conosco, por nos ajudar a suportar todo esse caminho percorrido, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Aos componentes da banca examinadora.

Ao povo brasileiro, por ter financiado a nossa formação acadêmica.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

RESUMO

Esse trabalho apresenta o estudo de um estabilizador de tensão alternada à tiristores, com um compensador que emprega o método de correção por degrau de tensão. A premissa de funcionamento é sobretudo de uma fonte de tensão controlada, que tem como intuito o condicionamento da tensão de saída, frente às perturbações do sistema. Como o principal objetivo do projeto é oferecer uma economia de energia ao setor residencial, garantindo a mesma eficiência e maior segurança dos usuários, os pontos principais do planejamento do sistema são o rendimento, fator de potência, distorção harmônica e a potência máxima estabelecida. Para o circuito de controle utiliza-se um método digital que permite o acionamento de diferentes tiristores que regulam o valor da tensão de saída com amplitude de acordo com uma referência pré-estabelecida. São retratados a metodologia de projeto, os resultados de estudos experimentais e os ensaios de um protótipo implementado com capacidade de corrente de carga de 1 Ampère, validando a teoria e comprovando-a com base nos modelos estabelecidos.

Palavras-chave: Regulador de tensão CA/CA. Controle por degrau de tensão. Tiristor. Compensador. Economia de energia. Rendimento.

ABSTRACT

This work presents the study of an AC voltage stabilizer by thyristors, with a compensator that employs the method of correction by voltage step, "tap changer technology". The base of operation is mainly a source of controlled voltage, which is intended to condition the output voltage, in the face of disturbances of the system. As the main objective of the project is to provide energy savings to the residential sector, ensuring the same efficiency and safety of users, the main points of system planning are the performance, power factor, harmonic distortion and maximum established power. For the control circuit, a digital method is used which, according to the voltage steps, allows the activation of different thyristors that regulate the value of the output voltage with amplitude according to a pre-established reference. The project methodology, the results of experimental studies and the tests of a prototype implemented with load current capacity of 1 Ampère, validating the theory and proving it based on the established models.

Keywords: AC Voltage regulator. Control by voltage step. Thyristor. Compensator. Energy saving. Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação componente	18
Figura 2 – Esquemático componente	19
Figura 3 – a) Estrutura do TRIAC; b) Simbologia	19
Figura 4 – Curva Característica.....	20
Figura 5 – Representação Capacitor.....	21
Figura 6 – Representação resistor	21
Figura 7 – Representação LED	22
Figura 8 – Arduino Uno	23
Figura 9 – Ambiente de Desenvolvimento do Arduino.....	24
Figura 10 – Representação Codificador	24
Figura 11 – Transformador.....	26
Figura 12 – Representação Experimento Faraday	26
Figura 13 - Representação Experimento Lenz	28
Figura 14 – Estabilização de tensão por tiristores.....	28
Figura 15 –Circuito MOC3063.....	31
Figura 16 – Cruzamento com zero MOC.....	32
Figura 17 - Cruzamento com zero MOC.....	32
Figura 18 - Chaveamento Tranformadores	34
Figura 19 – Funcionamento MOC	41
Figura 20 – Chave Manual	43
Figura 21 – Led	44
Figura 22 – Fonte Variável	45
Figura 23 – Transformador.....	47
Figura 24 – 4 transformadores e fonte variável	48
Figura 25 – Montagem Final.....	50
Figura 26 - Circuito de controle com realimentação unitária	51
Figura 27 - Gráfico Linearização	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tabela verdade.....	25
Quadro 2 – Especificação Transformadores	34
Quadro 3 – Lista de componentes para a pcb.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BCD – Binary Coded Decimal

CI – Circuito Integrado

DIAC – Diode for Alternating Current

DNAEE – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA

FATEC – Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo

Fem – Força eletromotriz

Hz – Hertz

IDE – Integrated Development Environment

MHz – Megahertz

PWM – Pulse Width Modulation

SCR – Silicon Controlled Rectifier

TRIAC – Triode for Alternating Current

USB – Universal Serial Bus

V – Volt

VAC – Tensão de corrente alternada

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	22
Equação 2	27
Equação 3	27
Equação 4	29
Equação 5	29
Equação 6	34

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS	9
1. Introdução.....	14
2. Fundamentação teórica	18
2.1 Geração de disparo para tiristores	18
2.2 Chave de controle	19
2.2.1 Funcionamento.....	20
2.3 Capacitor	21
2.3.1 Capacitor eletrolítico.....	21
2.3.2 Capacitor Poliéster	21
2.4 Resistor	21
2.5 Led	22
2.6 Arduino	22
2.6.1 IDE – (Integrated Development Enviroment).....	23
2.7 Codificador	24
2.7.1 BCD 8421.....	25
2.8 Transformador	26
2.8.1 Lei de Faraday	26
2.8.2 Lei de Lenz.....	27
2.8.3 Técnica utilizada para estabelecer a tensão estabilizada	28
2.8.4 Perdas.....	28
2.8.5 Rendimento	29
3 Projeto	31
4. Testes.....	40
4.1 Compreensão do funcionamento do MOC	40
4.2 Acionamento com chave manual	42
4.3 Led	44

4.4 Fonte Variável	45
4.5 Transformador.....	46
4.6 Quatro Transformadores e fonte variável.....	48
4.7 Teste com Variac e duas lâmpadas	49
4.8 Fechar a malha	51
5 Conclusões	52
6 Propostas Futuras.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
APÊNDICE A - Código Fonte	56
APÊNDICE B – Esquemático	61
APÊNDICE C – PCB (<i>Printed Circuit Board</i>).....	62

1. Introdução

Essa unidade contém toda motivação para a criação desse projeto, na qual, passa-se por um momento histórico explicativo citando quais são os problemas possíveis de solucionar e seus benefícios para a humanidade.

Energia é a capacidade de algo realizar trabalho, ou seja, gerar força num determinado corpo, substância ou sistema físico.

A origem desse termo vem do grego “ergos”, que tem como significado original literalmente “trabalho”. Já na Física, a energia está relacionada à capacidade de um corpo de produzir movimento, atividade, mudança.

Em nosso planeta, há inúmeras fontes de energia, essas, se dividem em dois principais tipos: as fontes renováveis e as não renováveis.

As fontes de energia renováveis são aquelas que provêm de recursos naturais e pode-se manter e ser usufruído ao longo do tempo sem que, dependendo da intensidade de exploração e normalmente disponibilidade em fluxos não controláveis, haja a possibilidade de esgotamento, como por exemplo, a energia solar e eólica.

Por outro lado, as fontes de energia não renováveis, têm seus recursos limitados, sendo que esse limite depende da sua disponibilidade no nosso planeta, e da intensidade de exploração, como é o caso dos combustíveis fósseis, normalmente disponíveis com estoques armazenados na natureza

A principal fonte de energia que existe hoje é o petróleo, que além de não ser renovável e ser um dos principais responsáveis por fenômenos como o efeito estufa, ainda é motivo de muitas guerras e conflitos entre nações, principalmente nos países dependentes dessa fonte de energia para sua economia, como é o caso dos Estados Unidos.

A crescente dependência do ser humano por energia está acarretando em uma destruição de recursos naturais irreparável, a única

alternativa encontrada para amenizar esses danos é a economia e o consumo consciente e sustentável.

Por mais que seja óbvio o porquê é importante que se freie o dispêndio exorbitante de fontes de energia, alguns motivos se destacam; é extremamente oneroso e danoso para o meio ambiente gerar energia da maneira que se é realizada hoje; a geração por termoelétricas depende da queima de óleos, carvão ou cereais, como o milho, essa ação causa a subtração de área de plantio de alimentos e matérias-primas, além da intensa emissão de poluentes na atmosfera; A geração por hidroelétricas precisa ampliar enormes áreas para que se conceba um lago onde será instalada uma represa com geradores que são ativados pela liberação da água através deles, essa ação causa um desequilíbrio nos ecossistemas, o clima muda, os animais desaparecem, ocupam-se terras que poderiam ser ainda mais produtivas, fora o impacto social: no Brasil, por ano, mais de 33 mil pessoas são obrigadas a deixar suas casas e começar sua vida do zero em outra região, esse número alarmante acarretou na organização Movimento dos Atingidos por Barragens (MAB).

As formas mais conhecidas de geração de energia limpa são a solar e a eólica. Porém as mesmas não têm uma produtividade significativa se comparada com as anteriores. É necessário que haja economia até que as fontes renováveis e limpas sejam suficientemente eficientes a ponto de substituir às poluentes e prejudiciais ao meio ambiente.

Saber sobre o funcionamento da rede elétrica domiciliar faz toda a diferença na hora de usar um aparelho eletrônico ou elétrico, pois isso é essencial para um melhor desempenho e durabilidade do equipamento, além de auxiliar na hora de economizar energia.

A energia elétrica é disponibilizada em todo o país pelas companhias de fornecimento de energia. Essa energia sai da usina geradora com uma alta tensão e logo após é modificada, em pontos de distribuição, para as fases de baixa tensão.

Hoje, no Brasil, para os consumidores residenciais e comerciais, são duas as tensões nominais na distribuição de fases: 127 V e 220 V. É comum o questionamento acerca da tensão nominal de 110 V, afinal, alguns países utilizam-na e, no passado, a mesma também existia no Brasil. No entanto, recentemente, decidiu-se por padronizar a tensão nominal em 127 V e a antiga tensão de 110 V foi abandonada.

A partir de 1986, o governo brasileiro tomou uma série de providências para que as tensões de energia elétrica fossem padronizadas. O parâmetro era de 60 Hz e todas as tensões diferentes de 127 V passaram a ser proibidas no país.

O DNAEE (órgão que então regulamentava o fornecimento de energia elétrica, agora substituído pela ANEEL) deu um prazo para cumprimento das novas regras, que terminou em dezembro de 1999. Ao final desse período, todas as áreas abrangidas por tensões de 110 V foram substituídas para o sistema padrão de 127 V e 220 V.

Uma concessionária pode distribuir a rede elétrica de duas formas: em sistema trifásico com fases de 127 V ou então, em sistema trifásico com fases de 220 V. Quando uma rede tem fases de 127 V, ao ligar uma fase com um neutro, é possível obter uma tensão de 127 V (monofásica), já ao ligar duas fases, obtêm-se uma tensão de 220 V (bifásica). Enquanto que se a rede tem fases de 220 V, ao ligar uma fase com um neutro, consegue-se uma tensão de 220 V (monofásica), e, conseqüentemente ao ligar duas fases, obtêm-se uma tensão de 380 V (bifásica).

É importante notar que a diferença de potencial entre fase e neutro de 127 V, não é de 254 V, ou seja, o dobro, o mesmo vale para a DDP entre fase e neutro de 220 V, que não é 440 V. A resposta para essa constatação está no fato de que um sistema de energia trifásico está defasado em 120° , o que faz com que a tensão entre duas fases de uma rede elétrica seja a soma vetorial dessas tensões e não apenas a soma algébrica das mesmas.

O 220 V é uma ligação entre duas fases de 127 V, como o sistema de distribuição de energia é trifásico, isso é, composto por três fases de 127 V orientadas em 120° , o 220 V nada mais é do que a resultante de 127 V vezes 1,73¹. A mesma estrutura é utilizada para a tensão de 380 V.

Contudo, é necessário compreender as consequências que existem ao alimentar um aparelho destinado à utilização em tensão 110 V, em uma tomada de tensão com 127 V. De início, o aparelho irá funcionar, porém, como ele fora projetado para uma tensão menor e estará ligado em uma tensão maior, a tendência é que ele super aqueça, além de consumir mais energia e diminuir drasticamente sua vida útil, por isso, o principal objetivo é desenvolver um equipamento capaz de, a partir da tensão de rede e suas variações, estabilizar a tensão de saída em 110 V, e assim, garantir a mesma eficiência dos 127 V, porém com menor consumo de energia e maior segurança para seus usuários.

¹ Este número é a raiz quadrada de 3, que fora obtido pela multiplicação de duas vezes o seno de 120° , utilizado a fim de conseguir as componentes vetoriais de cada uma das duas fases de 127 V

2. Fundamentação teórica

Esse tópico tem o objetivo de apresentar ao leitor todos os componentes que são necessários para a execução do projeto, bem como, uma breve explicação individual de suas particularidades e funções no circuito com o acréscimo dos conceitos físicos e matemáticos. Por meio de diversas bibliografias, procurou-se utilizar tecnologias mais atuais, assim, o Arduino possui a função de controlar todos os acionamentos vinculados a lógica definida.

2.1 Geração de disparo para tiristores

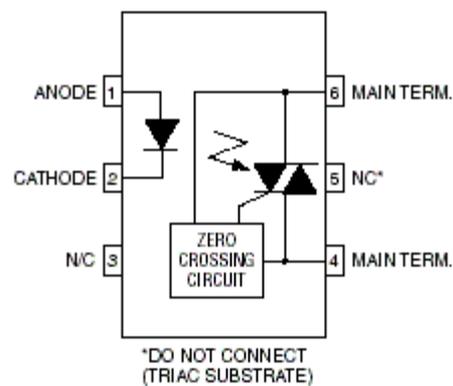
O circuito gerador de pulso de disparo, fabricado com o código comercial MOC3063 (MOC) é um CI com isolamento óptico. Dentro dele, há um led infravermelho e um DIAC (Diodo de Corrente Alternada), esse DIAC é excitado a partir de um sinal luminoso produzido pelo led. O controle das partes internas desse CI não está conectado eletricamente, sendo possível trabalhar com diferentes tipos e valores de tensão no mesmo circuito, por essa razão, nomeia-se de componente isolador. Com base nessas informações, é possível ter uma base inicial de como é o funcionamento do MOC e suas possíveis aplicações, conforme apresentado nas figuras 1 e 2.

Figura 1 – Representação componente



Fonte: Datasheet

Figura 2 – Esquemático componente

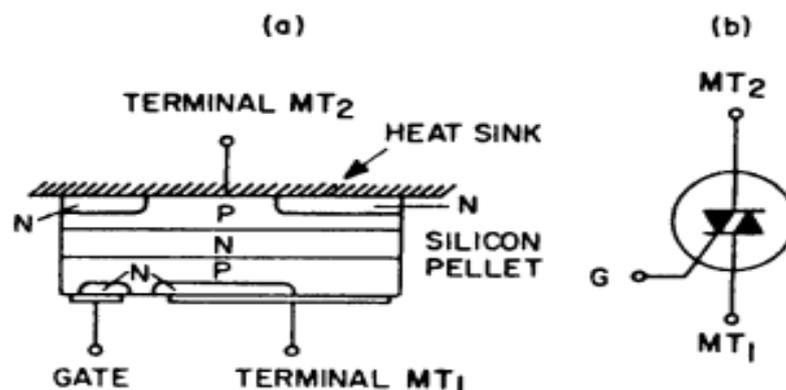


Fonte: Datasheet

2.2 Chave de controle

O TRIAC, que é a chave de controle do circuito, é um componente eletrônico pertencente à classe dos tiristores, que consiste na associação de dois SCR's conectados internamente em antiparalelo, possuindo na sua composição quatro camadas P-N-P-N alternadamente e 3 terminais sendo: anodo, catodo e gatilho. É considerado um dispositivo bidirecional, atuando em ambos os sentidos de condução de corrente elétrica e seu pulso de disparo pode ser positivo ou negativo. A estrutura e sua simbologia estão apresentadas na figura 3-a e 3-b, respectivamente.

Figura 3 – a) Estrutura do TRIAC; b) Simbologia



Fonte: Apostila curso de engenharia elétrica UFRJ

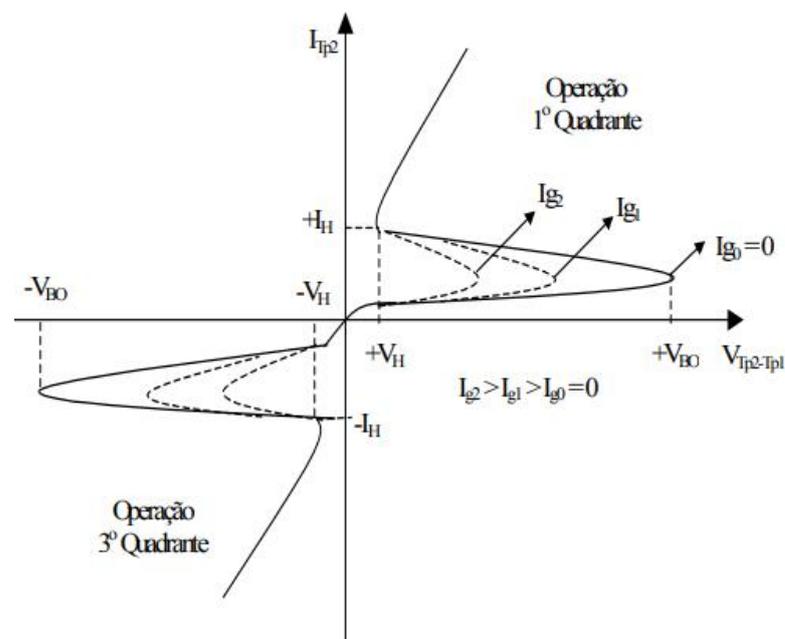
2.2.1 Funcionamento

Após sofrer uma excitação no terminal de gatilho (gate), o triac entra em modo de condução que é efetuado por uma tensão positiva ou corrente negativa, representado na curva característica (Figura 4) pelo primeiro e terceiro quadrante, onde no primeiro quadrante com polaridade direta (ânodo positivo em relação ao catodo), o terminal nº 2 é positivo em relação ao terminal 1, ou com polarização indireta (ânodo negativo em relação ao catodo), onde o terminal nº2 é negativo em relação ao terminal nº1.

Ao aumentar a tensão positiva entre os terminais MT1 e MT2, atinge-se a tensão de ruptura do dispositivo, fazendo com que o componente passe de um estado de bloqueio para um estado de condução, cessando sua corrente apenas quando a corrente I_{p2} , ultrapasse os valores de ($I_g=0$).

Por possuir a mesma configuração de operação no primeiro e terceiro quadrante o triac é capaz de operar para o estado on/off em ambos os casos.

Figura 4 – Curva Característica

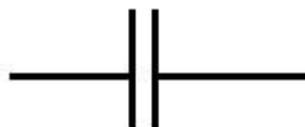


Fonte: eletrônica-pt.com

2.3 Capacitor

O capacitor é um componente eletrônico que tem a capacidade de armazenar energia elétrica sob a forma de um campo eletrostático, ele pode ser encontrado em alguns diferentes tipos de materiais, sendo eles: cerâmico, eletrolítico, poliéster e tântalo. A unidade adotada pelo Sistema Internacional para os capacitores é o Faraday (F). Simbologia na figura 5.

Figura 5 – Representação Capacitor



Fonte: Autor Próprio

2.3.1 Capacitor eletrolítico

Possui o material dielétrico de espessura extremamente pequena, internamente é composto por duas folhas de alumínio, separadas por uma camada de óxido de alumínio, enroladas e embebidas em um eletrólito líquido e diferentemente dos demais possui polaridade.

2.3.2 Capacitor Poliéster

É um capacitor bastante compacto formado por várias camadas de poliéster e alumínio, possui a capacidade de se autorregenerar, podendo operar em temperaturas e tensões altas.

2.4 Resistor

Resistores são dispositivos eletrônicos cuja função é limitar o fluxo de corrente elétrica que passa pelo circuito. A unidade adotada pelo Sistema Internacional para os resistores é o ohm (Ω). Representado na figura 6.

Figura 6 – Representação resistor



Fonte: Autor Próprio

A essa limitação é dado o nome de resistência, calculada pela primeira lei de Ohm

$$R = \frac{V}{i} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

R = Resistência

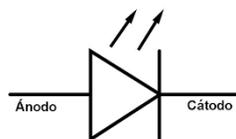
V = Tensão

I = Corrente elétrica

2.5 Led

O LED (light emitter diodo) ou diodo emissor de luz é um componente eletrônico que tem a função de transformar energia elétrica em luminosa, ele efetua esse tipo de transformação através de uma corrente que atravessa a sua junção P-N na qual excita-se um chip semiconductor ocorrendo a transformação, ele possui dois terminais em sua composição anodo (positivo) e catodo (negativo). Representado na figura 7.

Figura 7 – Representação LED



Fonte: Autor Próprio

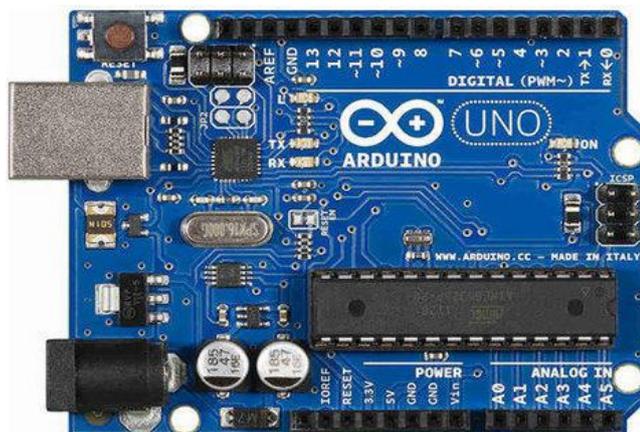
2.6 Arduino

O Arduino é uma plataforma de código aberto, criada por cinco pesquisadores no ano de 2005, na cidade de Ivrea, Itália, com o objetivo de ser um dispositivo de baixo custo e fácil de ser programável. Existente em suas mais diversas configurações, ele pode ser de três tipos: Uno, Mega e Leonardo.

Uno: possui um microcontrolador Atmega328 incorporado a seu corpo, 14 portas digitais sendo que seis delas podem ser usadas como saídas PWM, seis

portas analógicas, apresenta conexão USB, tensão de operação 5 V e alimentação 7-12Vdc. Representado na figura 8.

Figura 8 – Arduino Uno



Fonte: arduino.cc

2.6.1 IDE – (Integrated Development Environment)

Ambiente de desenvolvimento onde é possível a criação de códigos que são escritos e interpretados em forma de linguagem C pelo microcontrolador presente na placa. Sua linguagem de programação é modelada a partir da linguagem Wiring. Através da IDE é possível identificar e configurar qual o tipo de Arduino está sendo utilizado na operação e assim carregar os códigos digitados através da comunicação USB. A figura 9 apresenta o ambiente de desenvolvimento, onde é possível, escrever o programa, salvá-lo, carregar um programa salvo, fazer verificação de consistência e carregar a placa do arduíno com o programa.

Figura 9 – Ambiente de Desenvolvimento do Arduino



Fonte: Autor Próprio

2.7 Codificador

Codificador é um circuito combinacional que torna possível a passagem de um código conhecido para um desconhecido. **(CAPUANO, 2000)**. Através do codificador podemos transformar o código decimal, encontrado em uma das entradas M e transformá-lo para um código BCD conhecido acessando a saída do bloco funcional. Representado na figura 10.

Figura 10 – Representação Codificador



Fonte: Notas de aula Prof. Dr. César Augusto Macron

2.7.1 BCD 8421

O código BCD ou Binary Coded Decimal, é um sistema de codificação que representa um número decimal codificado em binário. Os dígitos 8421 correspondem aos valores dos algarismos em um número binário, números esses expressos por ($2^3 = 8$, $2^2 = 4$, $2^1 = 2$ e $2^0 = 1$). Esse código possui 3 bits e constitui números decimais entre 0 e 7. A lógica programada no microcontrolador está

O Arduino foi programado para usar o mesmo conceito da lógica bcd, porém com 4 bits, podendo então reproduzir números de 0 a 15. Esses números, representam a quantidade de saídas que o Arduino irá acionar, de acordo com o projeto será usada 2 vezes, pois é necessário efetuar soma de 15 volts e subtração de 15 volts. Conforme representado no quadro 1.

Quadro 1 – Tabela verdade

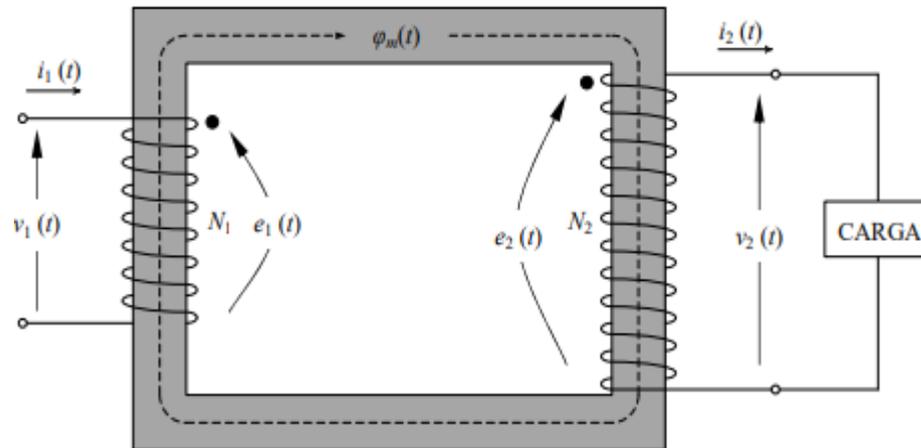
DECIMAL	BCD 8421			
	A	B	C	D
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

Fonte: Autor Próprio

2.8 Transformador

Transformador é um equipamento elétrico estático, que possui dois ou mais enrolamentos, e através de uma indução eletromagnética, transfere energia (tensão e corrente alternadas) entre diversos enrolamentos sem haver mudança de frequência no sistema. Representado na figura 11.

Figura 11 – Transformador



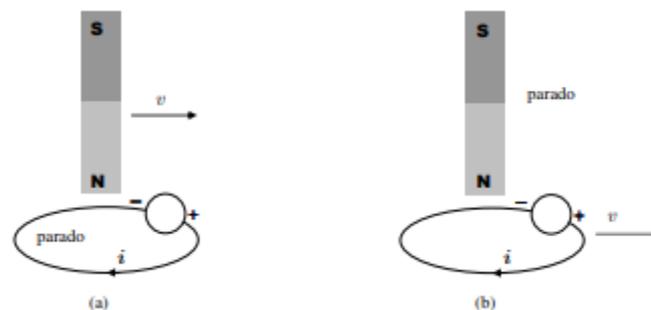
Fonte:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/349452/mod_resource/content/2/Transformador_es_Teo_2014%20%281%29.pdf

2.8.1 Lei de Faraday

Michael Faraday foi um cientista inglês, que no ano de 1831, formulou uma série de experimentos e entre esses, estava uma de suas mais importantes descobertas, representado na figura 12, na qual dizia:

Figura 12 – Representação Experimento Faraday



Fonte: cursos.if.uff.br

Ao movimentar um ímã, enquanto uma espira permanece parada (vice-versa), cria-se um campo magnético produzido pelo movimento do objeto, fluindo assim, uma corrente pelo condutor. Corrente essa obtida pela variação do campo magnético, variação essa que equivale ao surgimento de uma força eletromotriz, que é dado pela equação 2.

$$f. e. m = \frac{d\phi}{dt} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo:

ϕ = fluxo através da espira.

Porém o condutor costuma ter mais de uma espira, tendo a f.e.m, apresentada pela equação 3.

$$e(t) = -N \frac{d\phi}{dt} [V] \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:

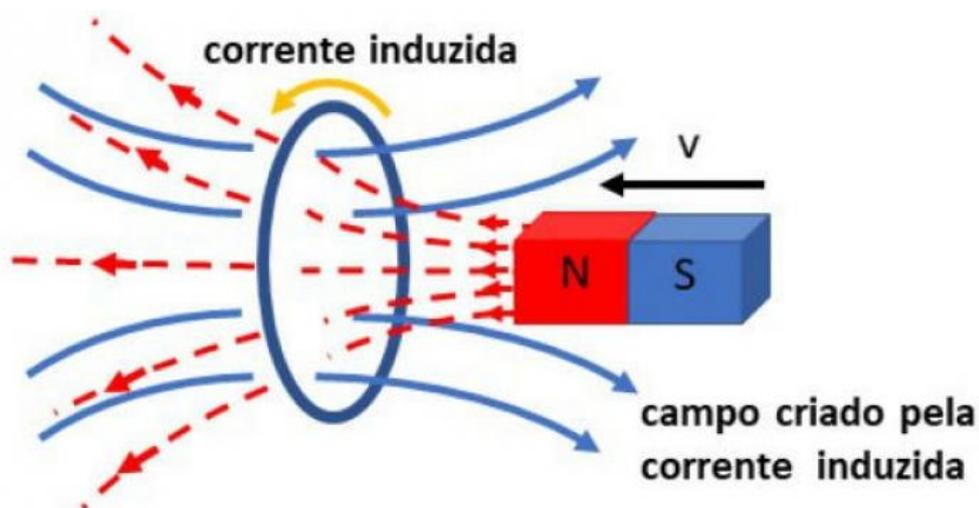
ϕ = Fluxo através da espira.

N = Número total de espiras na bobina.

2.8.2 Lei de Lenz

Heinrich Friedrich Emil Lenz foi um físico russo, que no ano de 1833 observou que a ação de uma corrente em uma espira ou bobina tende a gerar um campo magnético de forma a atrair o ímã que está se afastando e repelir o ímã que está próximo a ela, assim uma força eletromotriz fará com que seu efeito magnético se oponha a variação produzida. Representado na figura 13.

Figura 13 - Representação Experimento Lenz

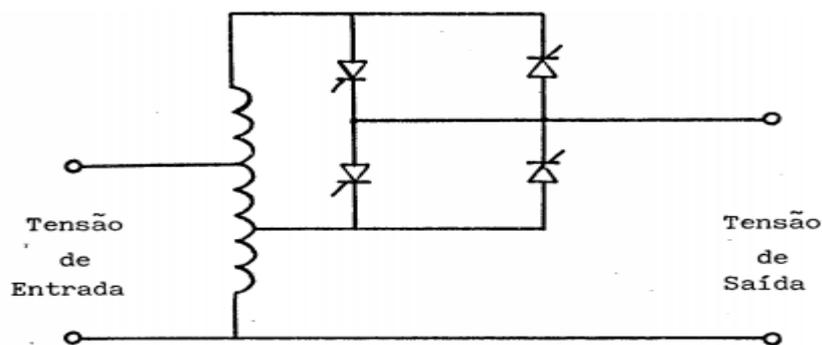


Fonte: todamateria.com

2.8.3 Técnica utilizada para estabelecer a tensão estabilizada

O método utilizado no trabalho será pela variação de tensão de saída pelo chaveamento entre os Tap's do transformador, com o auxílio dos tiristores (Triacs). Representado na figura 14.

Figura 14 – Estabilização de tensão por tiristores



Fonte: Estabilizador de tensão para carga não lineares

2.8.4 Perdas

As perdas ou escoamentos de potência representam quando a potência de saída do transformador apresenta valor distinto à de potência de entrada, existindo basicamente em três tipos, sendo eles:

Perdas no cobre: Perda resultante ao efeito Joule ocorre devido ao aquecimento das bobinas, tendo parte da energia dissipada como forma de calor.

Perdas por correntes parasitas: Perda resultante as correntes de Foucault, que são as correntes que circulam no interior do transformador através de um campo magnético variável. Essas perdas podem ser proporcionais ao fluxo de dispersão e apresentam o quadrado da dimensão de cada condutor, apresentando apenas a isolação dos componentes como forma de reduzir esse tipo de perda.

Perda no ferro ou por histerese: Perda associada à propriedade do material ferromagnético (átomos), onde durante o ciclo de magnetização, uma parte da energia é consumida para que esses átomos voltem a se realinhar.

2.8.5 Rendimento

O rendimento do transformador é definido pela relação entre duas potências, potência ativa entregue a carga e potência ativa total entregue ao transformador pela fonte. Definidas pelas equações 4 e 5.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo:

P_{out} = Potência de Saída;

P_{in} = Potência de Entrada;

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{vfe} + P_{vcu}} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo:

P_{out} = Potência de Saída;

P_{vfe} = Perdas no ferro ou por histerese;

P_{vcu} = Perdas no cobre.

3 Projeto

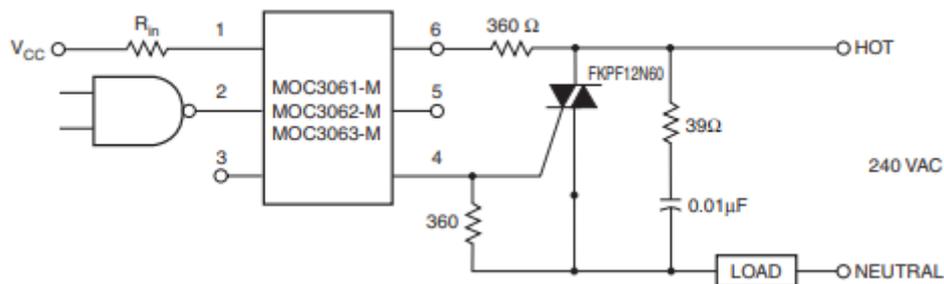
Nesse t3pico, 3 abordado o passo a passo do desenvolvimento do projeto, considerando-se, a partir das necessidades e da proposta, todos os procedimentos e m3todos utilizados para sua finaliza33o.

A priori, para a elabora33o do projeto, 3 necess3rio analisar o funcionamento de diversos componentes relacionados ao potencial circuito, fundamentando em artigos e trabalhos j3 existentes, mas com base em tecnologias n3o atualizadas.

O primeiro componente explorado foi o optoacoplador MOC3063, ap3s a compreens3o do seu funcionamento, foi montado o circuito base de seu *datasheet*, que constitui acionar uma carga ligada 3 rede el3trica. Esse componente garante um isolamento quando se est3 trabalhando com diferentes tens3es no mesmo circuito. Representado na figura 15.

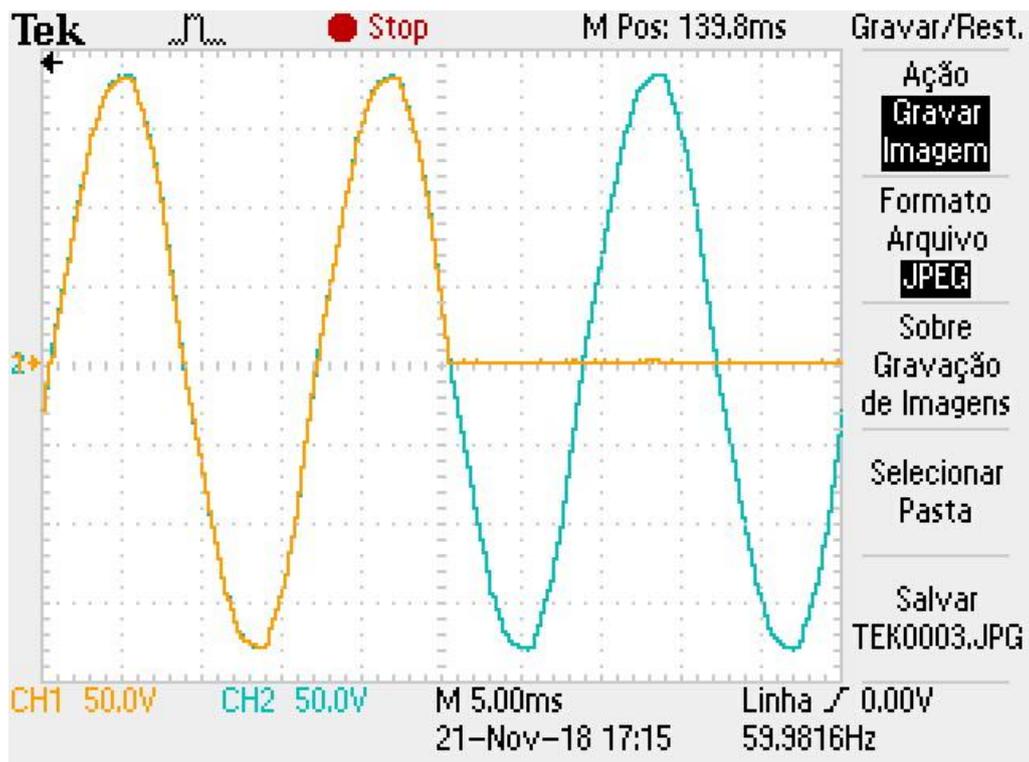
Como resultado do primeiro teste de funcionamento do sistema, este que, associado aos demais elementos como: chave, resistores, triac, capacitor e uma l3mpada como carga, possibilitou a certifica33o da teoria dada por seu circuito embutido de cruzamento com o zero. O instrumento oscilosc3pio digital foi utilizado para atestar esse e outros conceitos alusivos aos sinais gerados.

Figura 15 –Circuito MOC3063



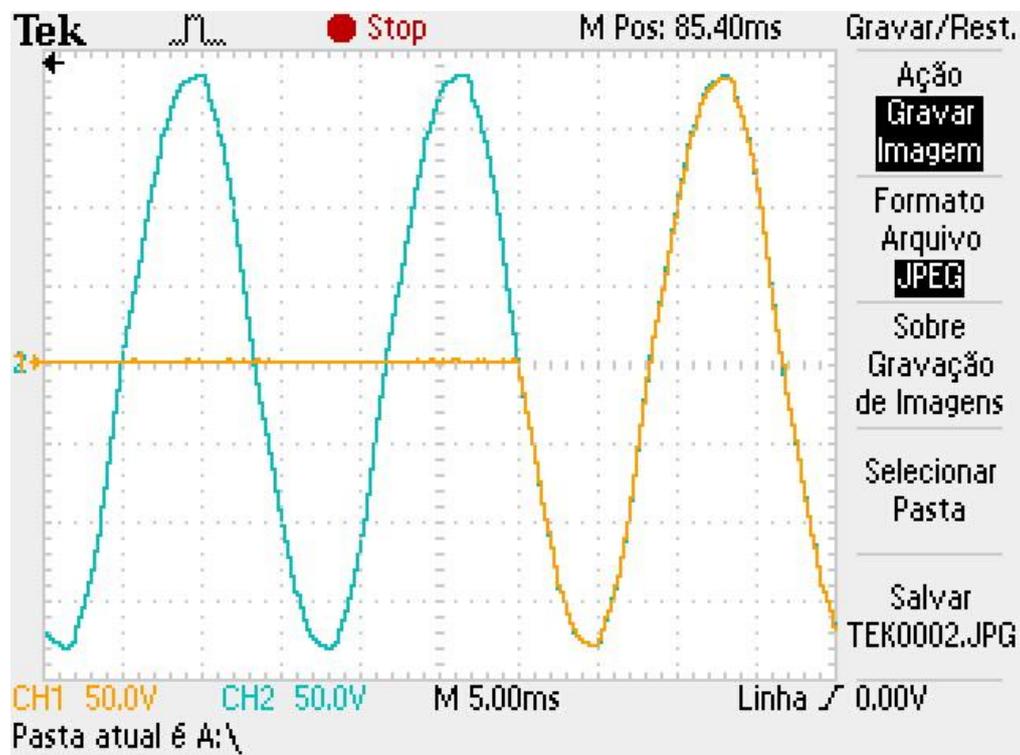
Fonte: Datasheet fairchild moc 3063

Figura 16 – Cruzamento com zero MOC



Fonte: Osciloscópio

Figura 17 - Cruzamento com zero MOC



Fonte: Osciloscópio

As figuras 16 e 17 exibem o gráfico plotado pelo osciloscópio digital usado no experimento, a onda em azul representa a senoide da rede, já as ondas em laranja, reproduzem o momento do acionamento e corte do MOC ao cruzar o eixo no zero.

Concluída a primeira etapa do projeto, os desafios começaram a evoluir, mostrando que era necessário um bom preparo técnico a respeito das teorias dos componentes eletrônicos. Outro elemento de extrema importância foi o TRIAC, uma vez que estava associado ao circuito de acionamento das cargas.

Após o primeiro contato com o circuito base de acionamento tiristorizado com optoacoplador, foi preciso definir qual seria exatamente o método que iria realizar a etapa principal que constitui o projeto, cuja qual está resumida em como somar e subtrair as tensões senoidais para corrigir e entregar uma tensão estabilizada em 110 Vac.

A ideia inicial era utilizar somente um transformador, este seria responsável por fazer toda a correção, para isso, suas características estruturais teriam que ser compostas por diversas derivações ou *tap's* no seu primário, e cada derivação receberia um circuito optoacoplado. Dessa maneira, de acordo com a tensão medida na rede, um respectivo enrolamento seria acionado para efetuar a correção.

Esse método, apesar de ter funcionalidade, se torna totalmente inviável quando os aspectos, precisão e potência, são considerados. Isso porque para precisão de 1 volt, seria necessário um transformador com muitas derivações, e elevando isso para o ambiente residencial, considerando uma potência de 60 A, encareceria demais o produto final. Houve também, a tentativa de acrescentar um transformador em série para tentar baratear o projeto, tornando-o mais viável, porém ainda não era o ideal.

Após uma série de esboços do possível método de correção a ser utilizado e com o auxílio de diversas bibliografias, surgiu-se a primeira estrutura do projeto. Era sabido que uma lógica binária seria utilizada para o microcontrolador Arduino Uno acionar o circuito dos optoacopladores, assim, cada circuito teria a função de somar ou subtrair a tensão. Restava então definir os demais

elementos do esquema, que são; circuito de potência, fonte medidora da tensão da rede e o circuito de proteção.

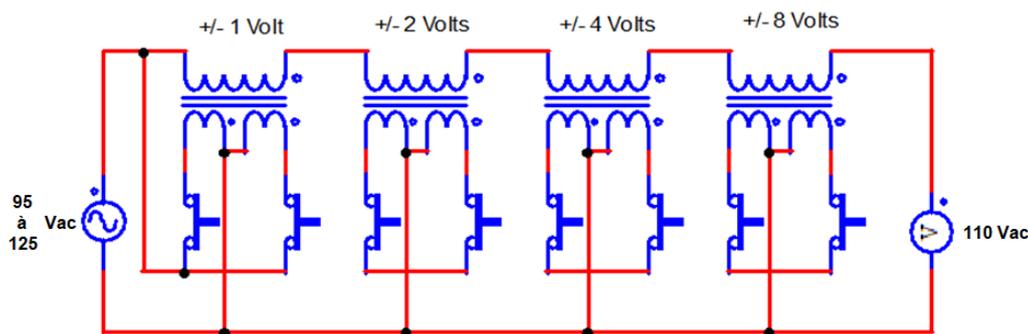
Para que fosse possível utilizar a lógica digital para a ativação dos transformadores, tornando-se viável o desenvolvimento, se fez necessária a aquisição de quatro transformadores com as especificações apresentadas no quadro 2. O circuito de chaveamento está representado na figura 18.

Quadro 2 - Especificação Transformadores

Transformador	Primário (V)	Secundário (V)	Corrente (A)
1	0 110 220	1	1
2	0 110 220	2	1
3	0 110 220	4	1
4	0 110 220	8	1

Fonte: Autor Próprio

Figura 18 - Chaveamento Transformadores



Fonte: Autor Próprio

Responsáveis por somar ou subtrair a tensão, os transformadores possuem uma relação entre o número de espiras existentes em seus enrolamentos. Essa relação é diretamente proporcional e está representada na equação 6, portanto, se a tensão do primário variar, a tensão do secundário também há de variar, devido o número de espiras ser constante. O próprio sistema de compensação utilizado nesse projeto garante que essa relação não interfere na estabilização da tensão de saída.

$$\frac{V1}{V2} = \frac{N1}{N2}$$

Equação 6

Sendo:

N_1 = Número de espiras do enrolamento primário

N_2 = Número de espiras do enrolamento secundário

V_1 = Tensão no enrolamento primário

V_2 = Tensão no enrolamento secundário

Tendo o conhecimento da lógica de controle que seria adotada para o projeto, continuou-se a etapa de testes. O segundo teste tinha características da lógica binária, uma vez que a simulação compreendia ativar uma carga com dois circuitos optoacoplados, sendo um em cada enrolamento primário do transformador tendo como referência o tape central. Inicialmente, os acionamentos foram feitos de forma manual, utilizando chaves.

Como foi possível representar manualmente e os demais sinais seriam gerados pela repetição dos circuitos, deu-se início ao desenvolvimento de um simulador digital, para isso, um programa foi criado para acionar leds de acordo com a tensão que era lida na entrada analógica (A0), a variação era feita por meio de um potenciômetro e os leds eram acionados exatamente como é a representação de duas tabelas verdade de quatro bits, simbolizando as somas e subtrações de 15 volts.

A simulação funcionou perfeitamente, com isso, deu-se início ao desenvolvimento de uma fonte que teria o objetivo de medir a tensão da rede. Até que o método fosse definido, foram geradas algumas ideias para fazer essa medição que foram, utilizar um divisor de tensão, amplificador operacional, optoacoplador e por fim, o uso de uma fonte com transformador. Segundo os experimentos, foi possível concluir que com transformador, a resposta obtida teve maior velocidade e apresentou maior estabilidade que os demais tipos.

O teste de número cinco recebeu o primeiro experimento com um transformador na saída ao invés dos leds de simulação, foi usado um oscilador de frequência analógico bit 9 para variar o seu acionamento, quando essa etapa estava sendo feita, houve um problema e ambos os moc's do circuito conduziram no mesmo momento porque um deles não teve tempo de se descarregar, isso ocasionou a queima dos moc's e triacs. Como solução, foi adicionado ao circuito

da entrada do moc um filtro regressor, com resistor e capacitor, que tem a função de descarregar a energia do componente mais rapidamente. Com o acréscimo desse filtro, o teste com um transformador funcionou de maneira plena. Restava então, adicionar os demais transformadores.

Após o circuito de controle ter sido definido e a etapa de testes nas *protoboards* estar gerando bons resultados, teve-se início o processo de prototipagem da placa de circuito impresso.

Antes de desenvolver a placa, foi necessário escolher um software para desenho de circuitos eletrônicos em circuitos impressos/PCB. Depois da seleção, foi gerado o diagrama esquemático (VIDE APÊNDICE B) que estruturaria as ligações pertinentes a cada um dos componentes.

Apesar de parecer uma atividade simples, alguns conceitos podem fazer toda a diferença quando se está construindo uma placa de circuito. Saber definir um bom layout, posicionando os componentes de uma maneira padronizada, organizada e alinhada é um fator determinante para a qualidade da placa. Quanto mais se tem estes parâmetros, maior também se torna a facilidade de entendimento na etapa de montagem e nas possíveis manutenções requeridas no hardware. (VIDE APÊNDICE C)

Toda a confecção da PCB foi feita partindo de uma placa de fenolite de face única com dimensões estruturais 150mm x 150mm, como os componentes estiveram compactados na placa e ocuparam um espaço de apenas 80mm x 150mm, a superfície restante foi reservada para o posicionamento do microcontrolador Arduino Uno, juntamente com as suas pinagens, que são: 5 volts, gnd, portas das entradas analógicas (A0, A4 e A5), portas das saídas digitais (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11), também foram posicionados os bornes dos cabos primários de todos os transformadores e um borne para a alimentação geral da placa (fase e neutro), que futuramente, seriam posicionados dentro de uma caixa com as dimensões apropriadas para conter todos os itens do projeto. Vide lista de componentes para a confecção da placa no quadro 3.

Quadro 3 - Lista de componentes para a pcb

Item	Material
1	Detergente Líquido
2	Esponja de aço
3	Papel couchê 115 g
4	Ferro de passar roupa
5	Placa de fenolite
6	Percloroeto de ferro
7	Perfurador
8	Caneta para escrita permanente
9	Ferro de solda
10	Estanho
11	Bacia plástica

Fonte: Autor Próprio

Para passar o circuito na placa, foram seguidos os procedimentos abaixo:

1. Lavar a placa com detergente líquido neutro a fim de eliminar possíveis gorduras e resíduos que estejam na placa;
2. Ariar com o auxílio de uma esponja de aço para limpar a oxidação da placa, assim como, marcas de dedos ou manchas escuras, deixando-a com um brilho uniforme;
3. Transferir o desenho do circuito que está impresso no papel diretamente para a placa, utilizando um ferro de passar roupas em sua máxima temperatura;
4. Esperar a placa esfriar e retirar o papel;
5. Conferir se todas as trilhas que estavam no papel foram passadas para a placa, caso não tenha passado em sua totalidade, preencher as falhas com uma caneta permanente;
6. Pegar uma bacia plástica para iniciar o processo de corrosão;
7. Imergir a placa no percloroeto e mexer a bacia até que o cobre tenha se soltado dos espaços sem a tinta;
8. Lavar a placa em água corrente;
9. Furar as ilhas do circuito com o auxílio de um furador;
10. Posicionar os componentes da maneira correta;
11. Soldar os componentes do circuito com ferro de solda e estanho;
12. Testar continuidade em todas as trilhas com o auxílio de um multímetro digital;

13. Testar o circuito com o programa.

Para a sustentação dos transformadores, foi utilizada uma madeira nas dimensões apropriadas para caber na caixa, esta foi doada pela empresa AMARANTE Madeireira LTDA. Para um aprimoramento estético, a madeira foi encapada com papel contact da cor preta e parafusos atarraxantes foram os responsáveis pela fixação dos transformadores. A caixa plástica que contém todo o projeto recebeu furações para o posicionamento do LCD 16X2 e para a passagem dos cabos de entrada e saída da rede.

Com a placa de circuito impressa finalizada, foram testadas todas as ligações dos 8 circuitos de controle, de forma individual e em conjunto. Em seguida, a fonte que continha um potenciômetro para variar o nível de tensão enviado à entrada analógica do Arduino, foi substituída pelo variac e a nova fonte, constituída por um transformador, diodo e capacitor de poliéster metalizado.

A implementação da nova fonte demandou uma modificação nos parâmetros da programação, para entregar um sinal mais linear na entrada analógica, o que resultaria melhor efeito com as variações da tensão imposta pela saída do Variac.

Nesses testes, já era possível gerar a tensão estabilizada em 110 volts, porém, quando conectado o osciloscópio na saída do estabilizador, valores diferentes de 110V eram mostrados. Baseando-se nos conceitos de transformadores, havia a possibilidade de não estarem referenciados pela mesma mútua, a correção desse problema veio quando foram retirados todos os transformadores da placa e as mútuas ajustadas individualmente.

Novamente, o objetivo de gerar o sinal de saída em amplitude de 110 volts não foi atingido e a causa foi ter ligado todas as mútuas de maneira invertida em relação à rede. Finalmente, quando trocadas as referências, o sinal se manteve estável e com a amplitude desejada.

O último método colocado em prática antes da entrega do projeto foi a inversão da posição da fonte que gera o sinal analógico para o Arduino e o fechamento da malha de controle do circuito.

Ao invés de ter um medidor da rede na entrada da caixa, um sistema de controle passa a ser implementado, e pelo conceito de realimentação, o sensor obtém o valor que é gerado e pela diferença entre esse valor e a tensão de referência, há um valor de erro que controlador efetua sua correção. O sensor trabalhando nesse processo de realimentação, garante-se a tensão de referência.

4. Testes

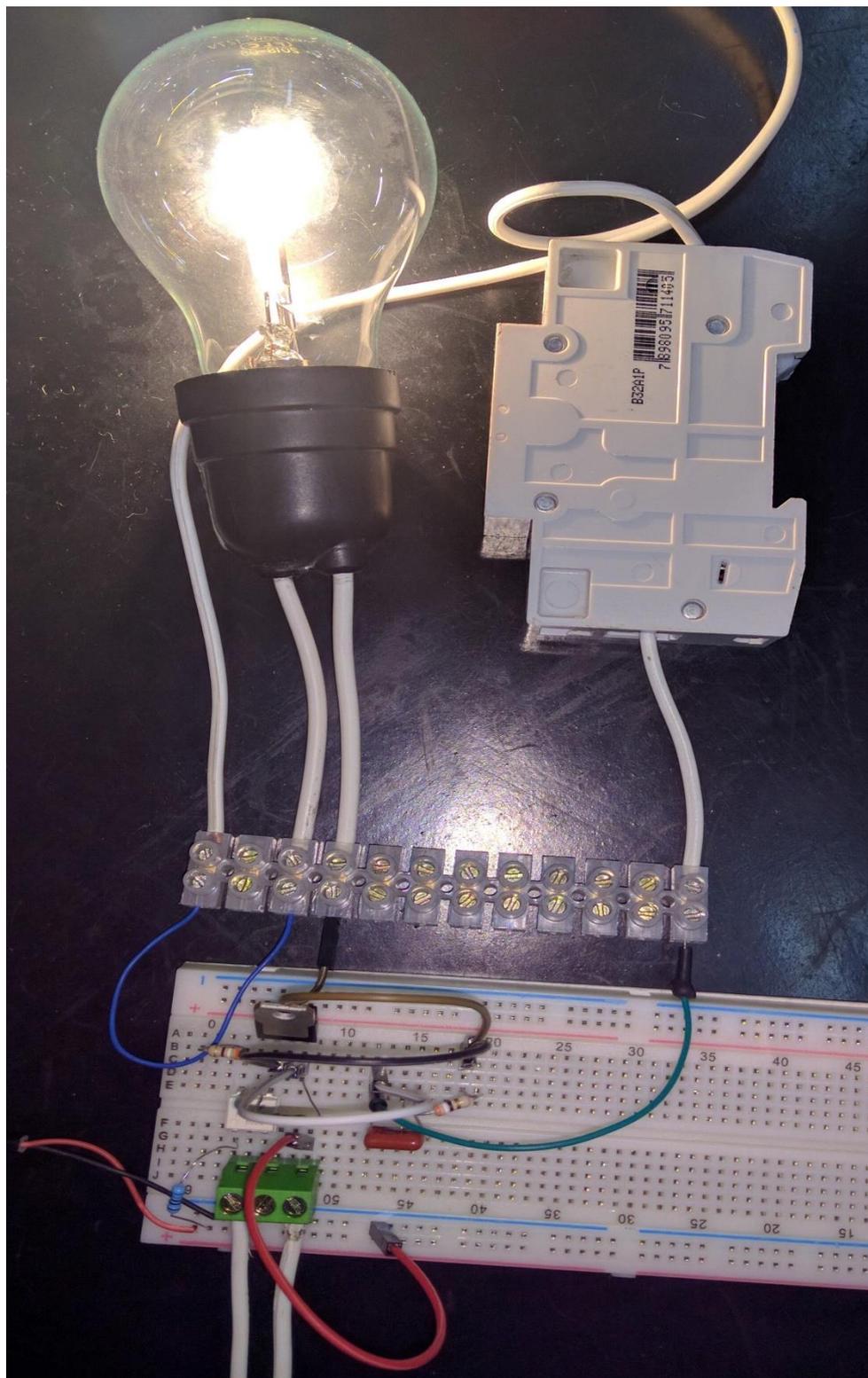
Esse item da monografia tem o objetivo de explicar os testes que foram efetuados durante o desenvolvimento do projeto, expondo todas as conclusões obtidas nos ensaios, bem como, comentários das modificações necessárias para alcançar os resultados esperados.

4.1 Compreensão do funcionamento do MOC

A princípio, o primeiro teste teve a função de compreendermos o funcionamento do componente MOC3063 e suas funcionalidades. Como mostra a figura 19 utilizamos o circuito de seu datasheet como referência, para observarmos o comportamento do componente.

Nesse primeiro circuito, o MOC foi utilizado para dar um pulso de corrente no tiristor conectado à lâmpada. Esse, por sua vez, manteve a lâmpada ligada enquanto o MOC estava recebendo tensão, já que o tiristor tem por função ser uma chave fechada enquanto o MOC se mantém ativo. Com a condição que, é a maior particularidade deste CI, apenas alterou o estado da lâmpada quando houve o cruzamento com o zero da senoide. Assim, independente se a tensão da lâmpada estivesse em um valor diferente de zero, ele acionava quando passasse pelo zero, e permanecia verificando isso em todos os zeros do sinal senoidal, se o MOC estivesse ligado, acionaria a lâmpada no zero, caso contrário, desligaria.

Figura 19 – Funcionamento MOC



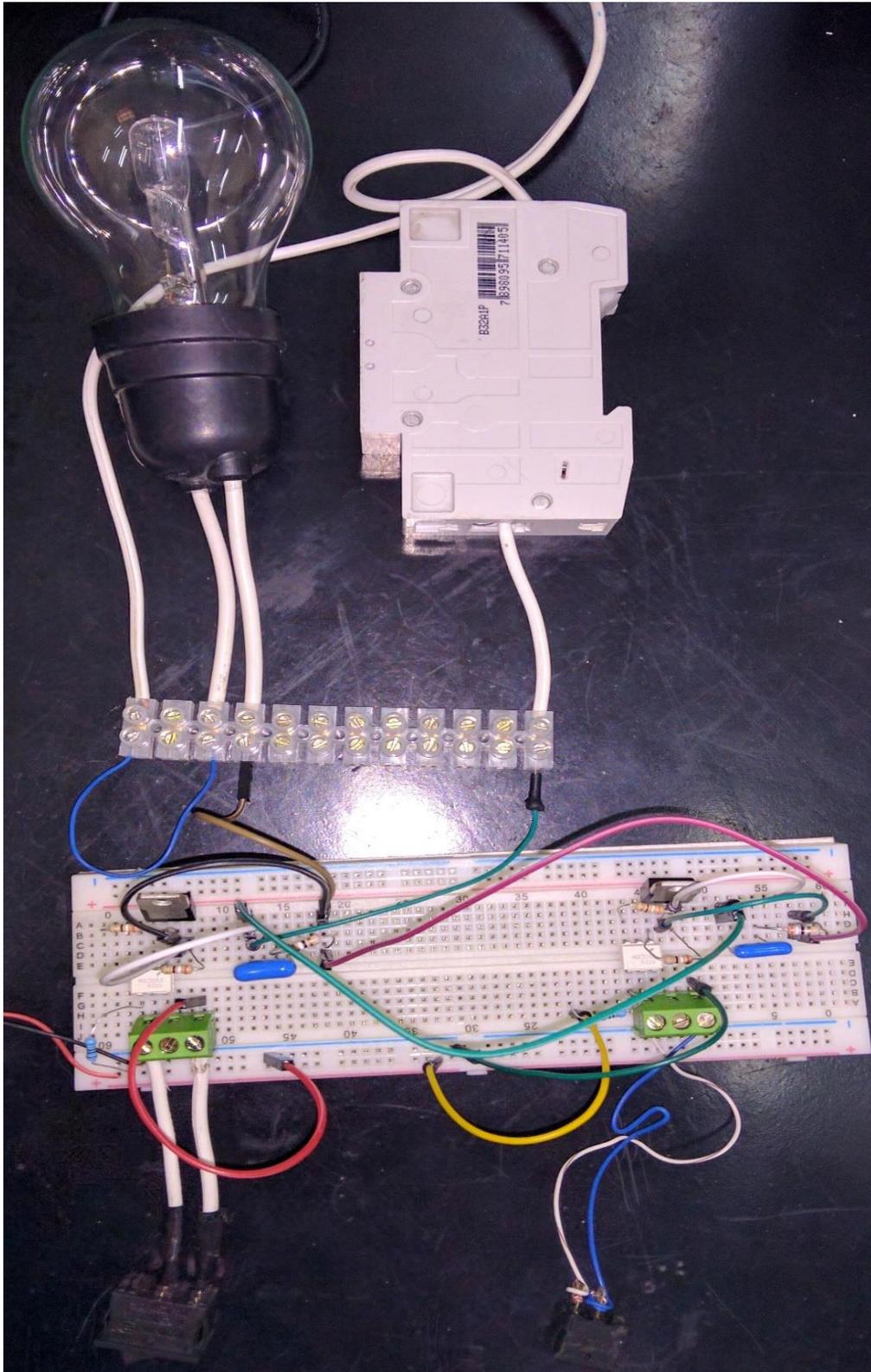
Fonte: Autor Próprio

4.2 Acionamento com chave manual

Após o sucesso obtido no primeiro teste, resolvemos fazer algumas alterações no circuito anterior. Desta forma, replicamos o circuito 1 na placa e adicionamos em cada circuito uma chave manual, e por fim, trocamos a lâmpada por um transformador. Representado na figura 20.

O objetivo desse teste era interpretar o comportamento do sistema quando adicionado dois circuitos de chaveamento, pois quando houvesse uma das chaves conectadas, o mesmo deveria conduzir, e quando não houvesse nenhuma chave, não haveria nenhum tipo de condução.

Figura 20 – Chave Manual

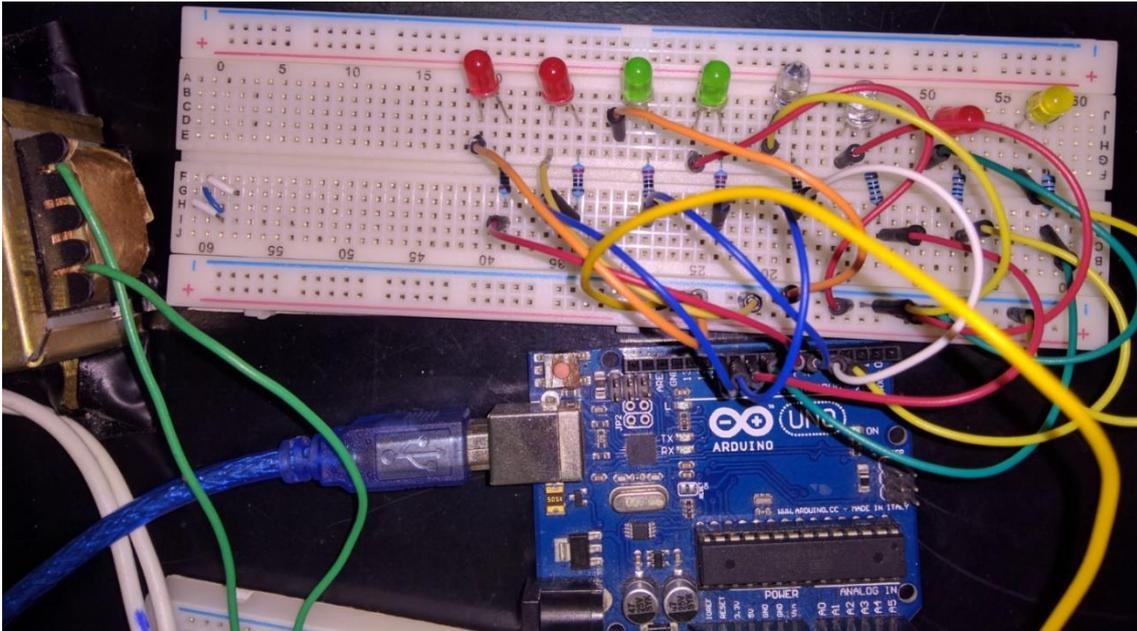


Fonte: Autor Próprio

4.3 Led

Depois de efetuarmos todos os testes com o hardware, iniciamos os testes com o software, no qual tivemos o auxílio da placa Arduino uno e montamos um protótipo que possuía 8 leds, os quais representariam cada tap de seu respectivo transformador. Representado na figura 21.

Figura 21 – Led

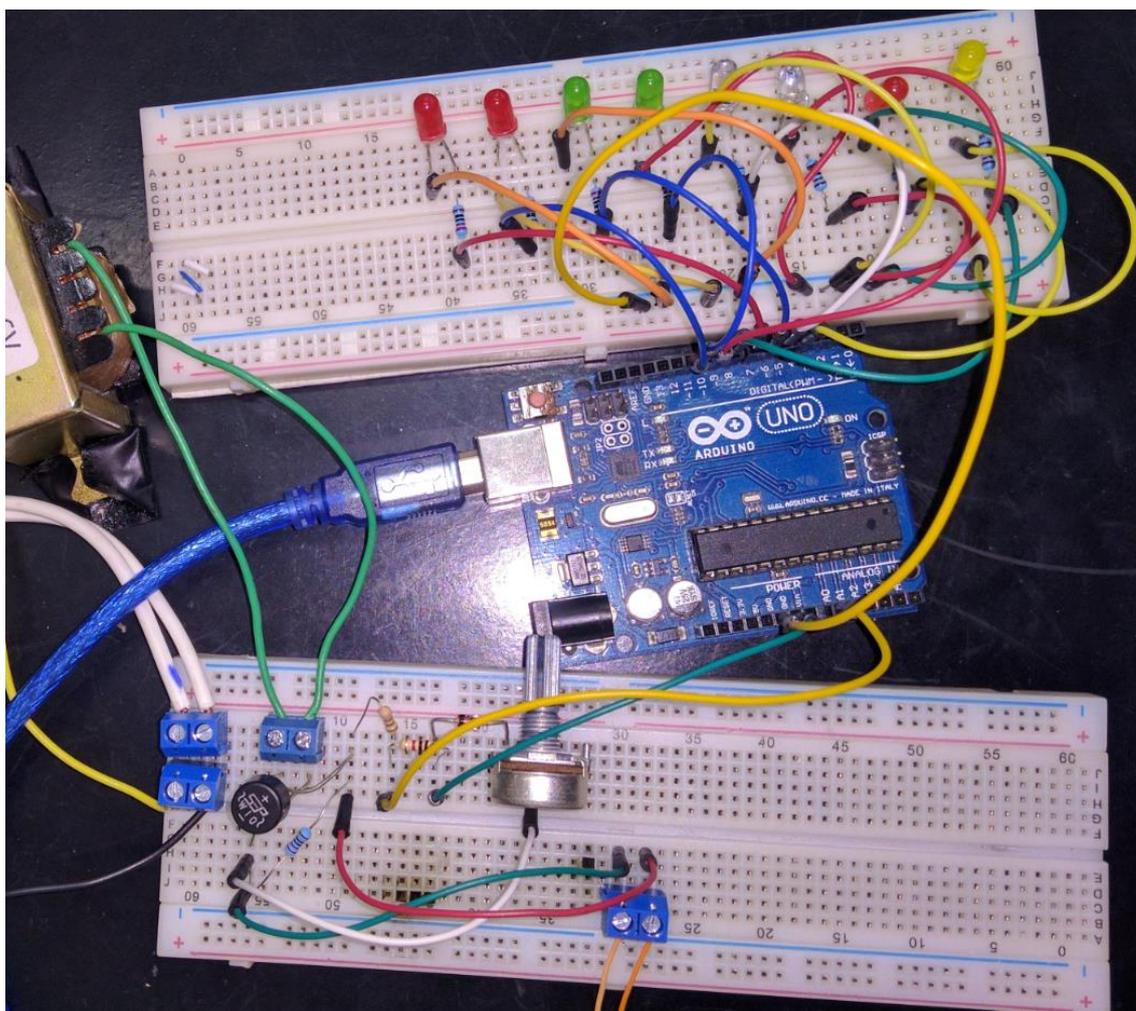


Fonte: Autor Próprio

4.4 Fonte Variável

Integrado ao teste 4, foi construída uma fonte medidora de tensão, que com o auxílio de um potenciômetro, tinha a função de simular a variação da rede, e assim efetuar os acionamentos pré-programados. (Apêndice A). Representado na figura 22.

Figura 22 – Fonte Variável



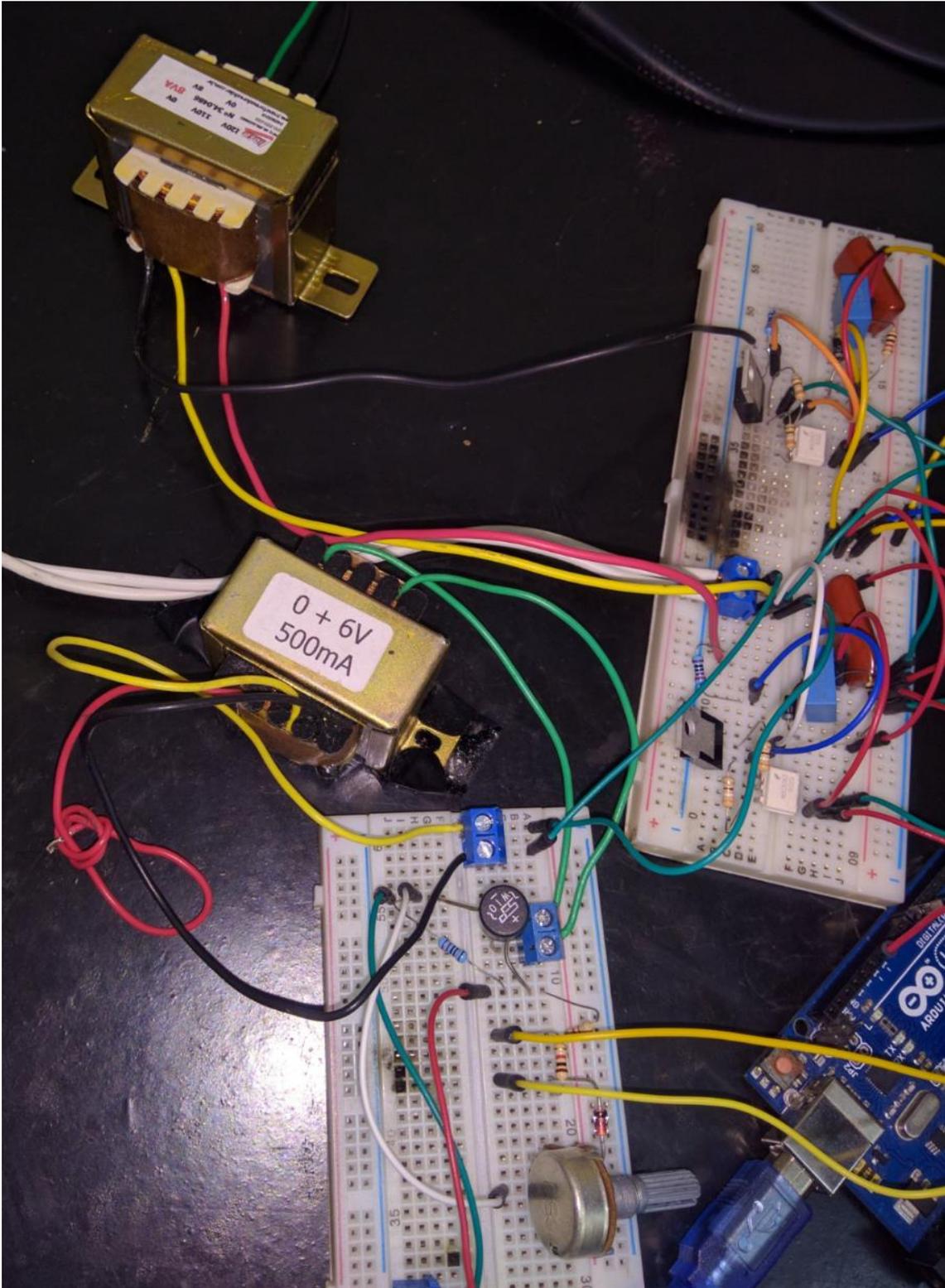
Fonte: Autor Próprio

4.5 Transformador

Pela primeira vez, aplicamos o circuito mais programação acionando o transformador, com o objetivo de não prejudicar nenhum transformador, inicialmente utilizamos dois transformadores, cada saída estava conectada a um enrolamento de cada transformador.

Então, partimos para um transformador só, conseguimos verificar no osciloscópio uma senoide quando uma saída estava sendo acionada, e uma cossenoide quando a outra saída era acionada, no caso, esses formatos de onda, representam a soma e subtração de tensão na rede. Representado na figura 23.

Figura 23 – Transformador

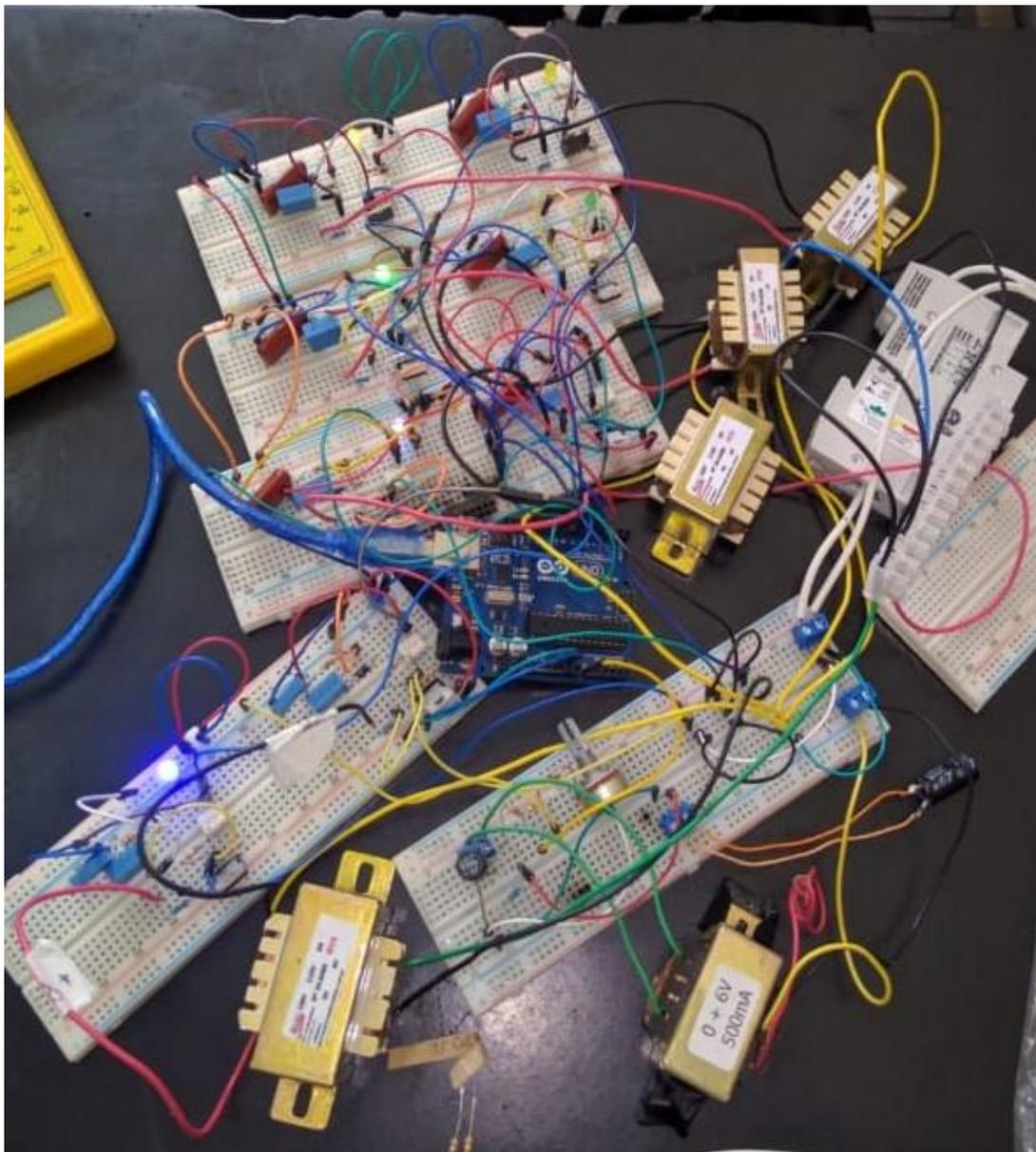


Fonte: Autor Próprio

4.6 Quatro Transformadores e fonte variável

Uma vez que o teste anterior estava em pleno funcionamento, a única coisa que implementamos foi um led indicando o acionamento de cada saída, e o acréscimo de três transformadores, assim o protótipo estava parcialmente completo, restando apenas a confecção da placa de circuito impresso e a alteração da fonte medidora, pela fonte com o variac. Representado na figura 24.

Figura 24 – 4 transformadores e fonte variável

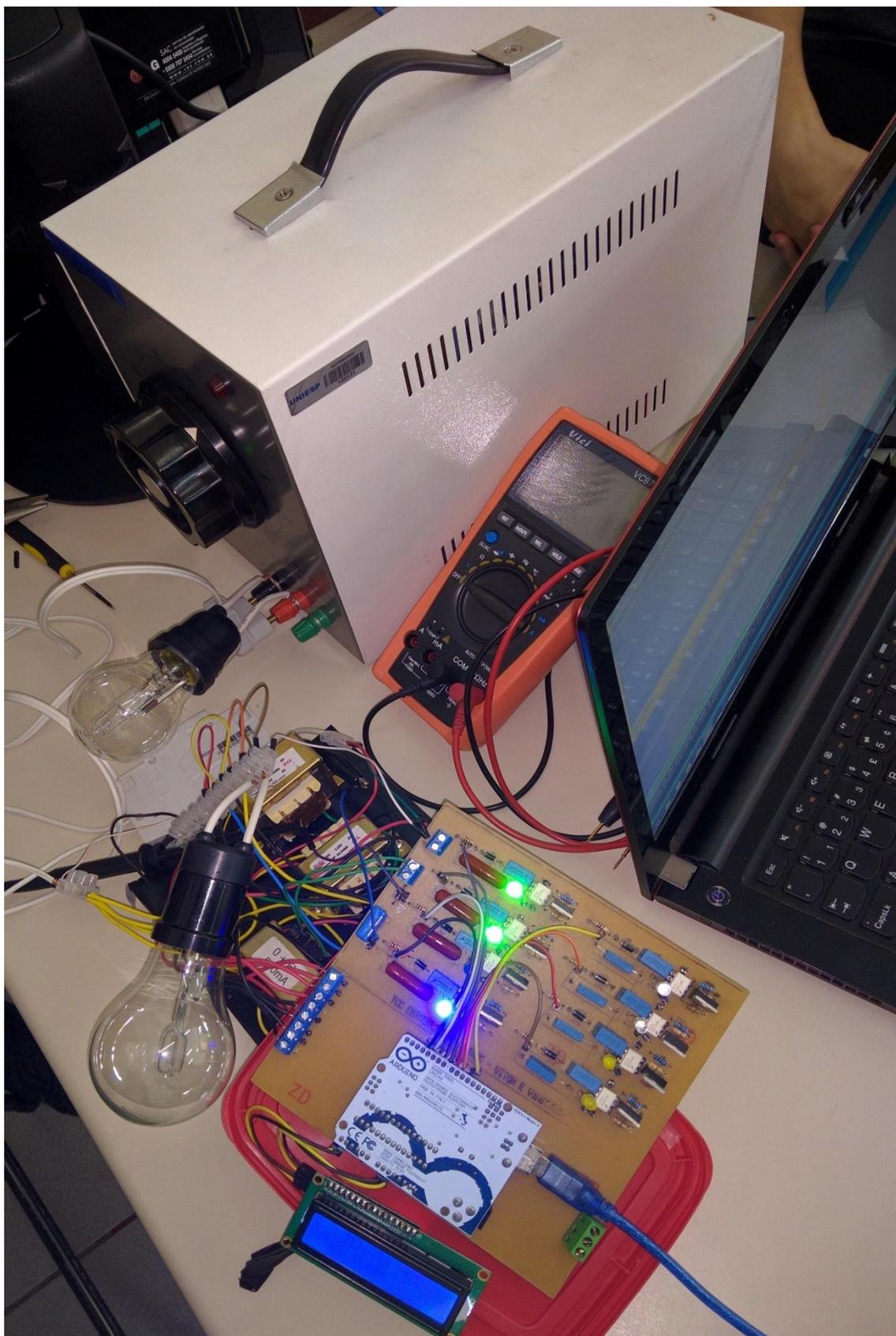


Fonte: Autor Próprio

4.7 Teste com Variac e duas lâmpadas

Após a confecção da placa de circuito impresso foram efetuados testes verificando se as ligações obtidas no software estavam corretas, posteriormente foram conectados todos os transformadores em suas respectivas saídas. Em seguida, foi adicionado a entrada do estabilizador o variac, juntamente com duas lâmpadas, uma na saída da fonte que possui a função de variar a intensidade luminosa, e outra após o estabilizador de tensão, que possui a função de manter a intensidade luminosa da lâmpada constante, comprovando a estabilização da rede, enquanto o teste fosse efetuado. Representado na figura 25.

Figura 25 – Montagem Final

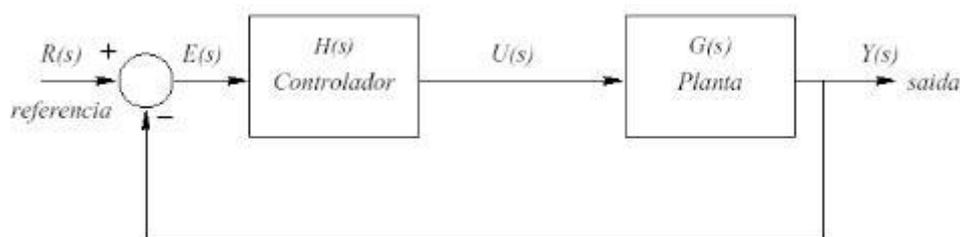


Fonte: Autor Próprio

4.8 Fechar a malha

O último processo do trabalho contempla o fechamento da malha de controle, o qual consiste em uma realimentação unitária da saída compensada. O sinal de referência contém o valor de tensão desejado, 110 volts, o $E(s)$ é o valor de erro produzido pela diferença entre a referência e a realimentação. O diagrama de controle está mostrado na figura 26.

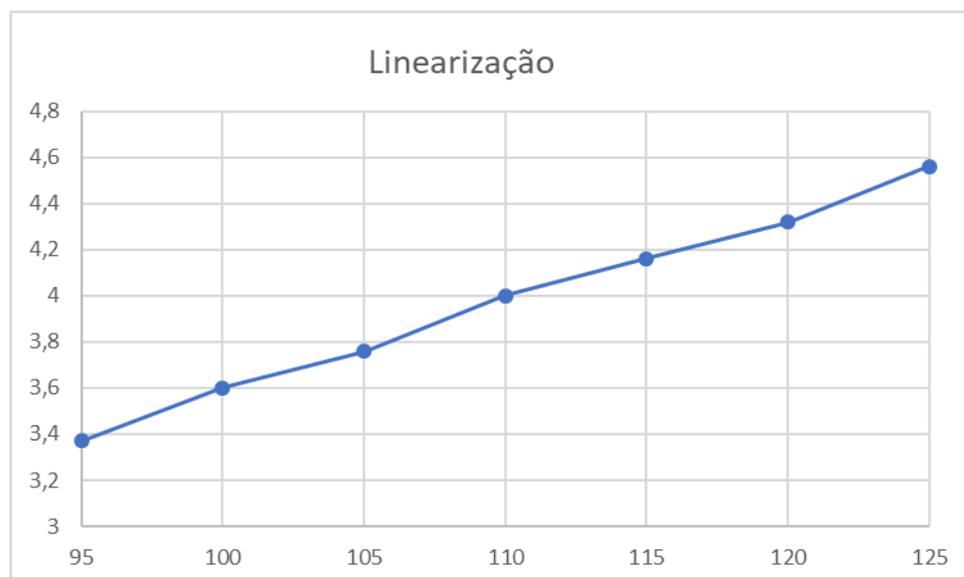
Figura 26 - Circuito de controle com realimentação unitária



Fonte: ebah.com

A compensação é aplicada por meio do software, na qual há um erro gerado, com o nome de X1, esse valor é calculado a partir do sinal da entrada analógica do Arduino, sua linearização está de acordo com os níveis de tensão de regulação (95 a 125). Representação na figura 27.

Figura 27 - Gráfico Linearização



Fonte: Autor Próprio

5 Conclusões

A proposta desse trabalho é atuar como um estabilizador de tensão alternada à tiristores, com o método de correção de controle por degrau de tensão, o qual visa um rendimento de aproximadamente 98%, não gera distorções harmônicas e apresenta um sinal sem ruídos ao sistema.

No seu desenvolvimento, diversas situações causaram complicações devido as facilidades de curto circuitos durante a montagem dos testes, ocasionando em danos irreparáveis aos componentes, que forçavam a troca, encarecendo e atrasando a conclusão do projeto.

Em um primeiro momento, a construção de todos os circuitos parecia impossível, mas após a definição de um deles, foi percebido que era somente replicar se atentando aos detalhes.

O principal objetivo do projeto é oferecer uma economia ao setor residencial, através da estabilização da tensão de saída da rede garantindo o máximo rendimento dos equipamentos, graças aos esforços conjuntos, foi possível atingir essa meta.

6 Propostas Futuras

Alterar o atual protótipo para um modelo destinado ao mercado, com uma caixa mais refinada, pcb e todos os componentes do circuito capazes de suportar a corrente máxima da residência.

Adicionar um sistema web com banco de dados mais supervisorio que mostra todos os pontos que estão sendo acionados na residência e gera relatórios de desempenho e eficiência do sistema, mostrando qual está sendo o valor em reais e a potência economizados;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KASSIK, Enio Valmor. - **Estudo.e Realização de Um Estabilizador de Tensão Alternada Senoidal à Tiristor.** 1983. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

PETRY, Clóvis Antônio. – **Estabilizador de Tensão Alternada para Cargas Não-Lineares.** 2001. 178 f. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) – Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina.

PETRY, Clóvis Antônio. – **Estabilizadores de Tensão Alternada para Alimentação de Cargas Não-Lineares: Estudo de Variações Topológicas e Métodos de Controle.** 2005. 259 f. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) – Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina.

MOITA, Galba Freire. **Estabilizador de Tensão Alternada Empregando Alta Freqüência e Transistor de Potência.** 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina

CARDOSO, César Mauro. **ESTUDO E REALIZAÇÃO DE UM ESTABILIZADOR DE TENSÃO ALTERNADA A TRANSISTOR DE POTENCIA.** 1986. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

IDOETA, I.; CAPUANO, F. **ELEMENTOS DE ELETRÔNICA DIGITAL.** 41. Ed. São Paulo: Editora Erica, 2012.

ALMEIDA, José Luiz Antunes de. **Dispositivos semicondutores: tiristores; controle de potência em CC e CA.** 10. Ed. São Paulo: Editora Érica,2000.

PUGLIA, Luiz Vasco. **Notas de aula da Disciplina de Eletrônica Industrial.** Curso de Mecatrônica Industrial. Fatec Santo André, Santo André, SP, 2018.

NOGUEIRA, Daniel da Silva. **TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA – TEORIA E APLICAÇÃO**. 2009. 212 f. Monografia (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SELO437_Aula07_Trafos. **Transformadores**. Disponível em:<
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3429400/mod_resource/content/1/SELO437_Aula07_Trafos.pdf> Acesso em: 18/05/2018.

EDISCIPLINAS_USP. **INTRODUÇÃO À ELETROMECAÂNICA E AUTOMAÇÃO, TRANSFORMADORES**. Disponível em:<
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/349452/mod_resource/content/2/Transformadores_Teo_2014%20%281%29.pdf> Acesso em: 16/05/2018.

FIGUEIRA, Antônio. **ESTABILIZADOR DE TENSÃO**. Revista Antenna Eletrônica Popular, Rio de Janeiro, v.4, abr.2006.

APÊNDICE A - Código Fonte

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#include <Wire.h>

long int soma = 0, tempo1,
tempo2; int i=0, j=0,
amostra[10];
int tensao;
int vref = 110;
int x1 =0;
int x2 =0;
int x3 =0;

#define tp1 4
#define tp2 5
#define tp4 6
#define tp8 7
#define tn1 8
#define tn2 9
#define tn4 10
#define tn8 11

LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE);
```

```
void ativarSaida(int ttn8, int ttn4, int ttn2, int ttn1, int ttp8, int ttp4, int ttp2,
int ttp1){

    if(tp1 == 1)digitalWrite(tp1,HIGH);
    else if(tp1 == 0)digitalWrite(tp1,LOW);

    if(tp2 == 1)digitalWrite(tp2,HIGH);
    else if(tp2 == 0)digitalWrite(tp2,LOW);

    if(tp4 == 1)digitalWrite(tp4,HIGH);
    else if(tp4 == 0)digitalWrite(tp4,LOW);

    if(tp8 == 1)digitalWrite(tp8,HIGH);
    else if(tp8 == 0)digitalWrite(tp8,LOW);

    if(ttn1 == 1)digitalWrite(tn1,HIGH);
    else if(ttn1 == 0)digitalWrite(tn1,LOW);

    if(ttn2 == 1)digitalWrite(tn2,HIGH);
    else if(ttn2 == 0)digitalWrite(tn2,LOW);

    if(ttn4 == 1)digitalWrite(tn4,HIGH);
    else if(ttn4 == 0)digitalWrite(tn4,LOW);

    if(ttn8 == 1)digitalWrite(tn8,HIGH);
    else if(ttn8 == 0)digitalWrite(tn8,LOW);}
```

```

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    tempo1=millis();
    tempo2=millis();
    lcd.begin (16,2);
    pinMode(tp1,OUTPUT);
    pinMode(tp2,OUTPUT);
    pinMode(tp4,OUTPUT);
    pinMode(tp8,OUTPUT);
    pinMode(tn1,OUTPUT);
    pinMode(tn2,OUTPUT);
    pinMode(tn4,OUTPUT);
    pinMode(tn8,OUTPUT);
}

void loop() { if(millis()-tempo1>=10){

    tempo1=millis();
    tensao =
analogRead(0)*0.1274;
}

if(millis()-tempo2>=50){
    tempo2 = millis();
    x1 = -vref +tensao;
    x2 = x1 + x3;
    if(x2>15)    x2=15;
    else if(x2<-15)    x2=-15;
    x3 = x2; //xanterior = xerroatual

    Serial.print("tensao:");
    Serial.println(tensao);
    Serial.print("X1: ");
    Serial.print(x1);
    Serial.print(" X2: ");
    Serial.println(x2);
}
}

```

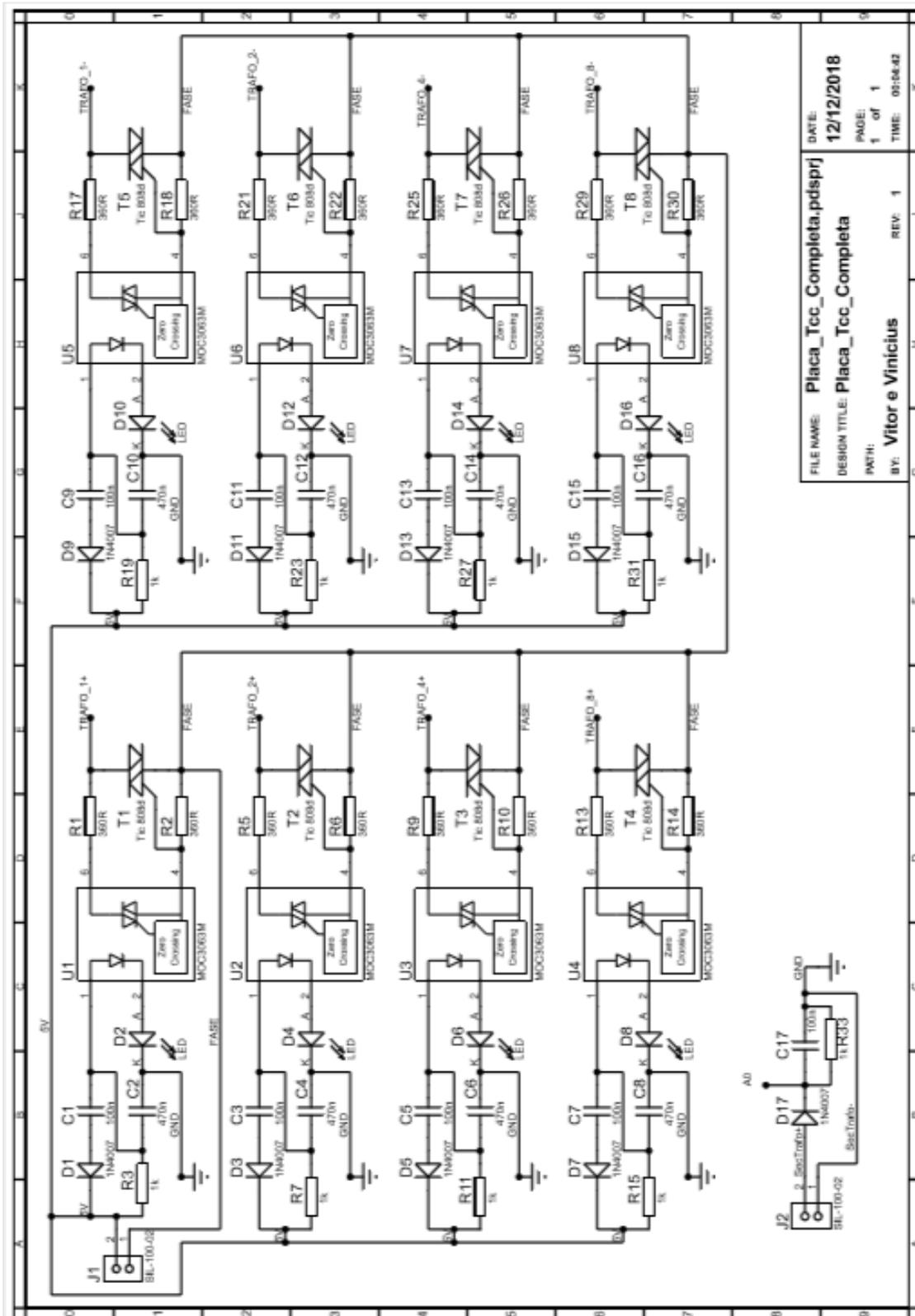
```
lcd.setCursor(2,0);
lcd.print("TCC FATEC SA");
lcd.setCursor(1,1);
lcd.print("TENSAO: ");
lcd.setCursor(10,1);
lcd.print(tensao);
lcd.setCursor(14,1);
    lcd.print("V");

}

switch(x2){
  case -15: ativarSaida(1,1,1,1,0,0,0,0); break;
  case -14: ativarSaida(1,1,1,0,0,0,0,0); break;
  case -13: ativarSaida(1,1,0,1,0,0,0,0); break;
  case -12: ativarSaida(1,1,0,0,0,0,0,0); break;
  case -11: ativarSaida(1,0,1,1,0,0,0,0); break;
  case -10: ativarSaida(1,0,1,0,0,0,0,0); break;
  case -9: ativarSaida(1,0,0,1,0,0,0,0); break;
  case -8: ativarSaida(1,0,0,0,0,0,0,0); break;
  case -7: ativarSaida(0,1,1,1,0,0,0,0); break;
  case -6: ativarSaida(0,1,1,0,0,0,0,0); break;
  case -5: ativarSaida(0,1,0,1,0,0,0,0); break;
  case -4: ativarSaida(0,1,0,0,0,0,0,0); break;
  case -3: ativarSaida(0,0,1,1,0,0,0,0); break;
  case -2: ativarSaida(0,0,1,0,0,0,0,0); break;
  case -1: ativarSaida(0,0,0,1,0,0,0,0); break;
  case 0: ativarSaida(0,0,0,0,0,0,0,0); break;
  case 1: ativarSaida(0,0,0,0,0,0,0,1); break;
  case 2: ativarSaida(0,0,0,0,0,0,1,0); break;
  case 3: ativarSaida(0,0,0,0,0,0,1,1); break;
  case 4: ativarSaida(0,0,0,0,0,1,0,0); break;
  case 5: ativarSaida(0,0,0,0,0,1,0,1); break;
  case 6: ativarSaida(0,0,0,0,0,1,1,0); break;
```

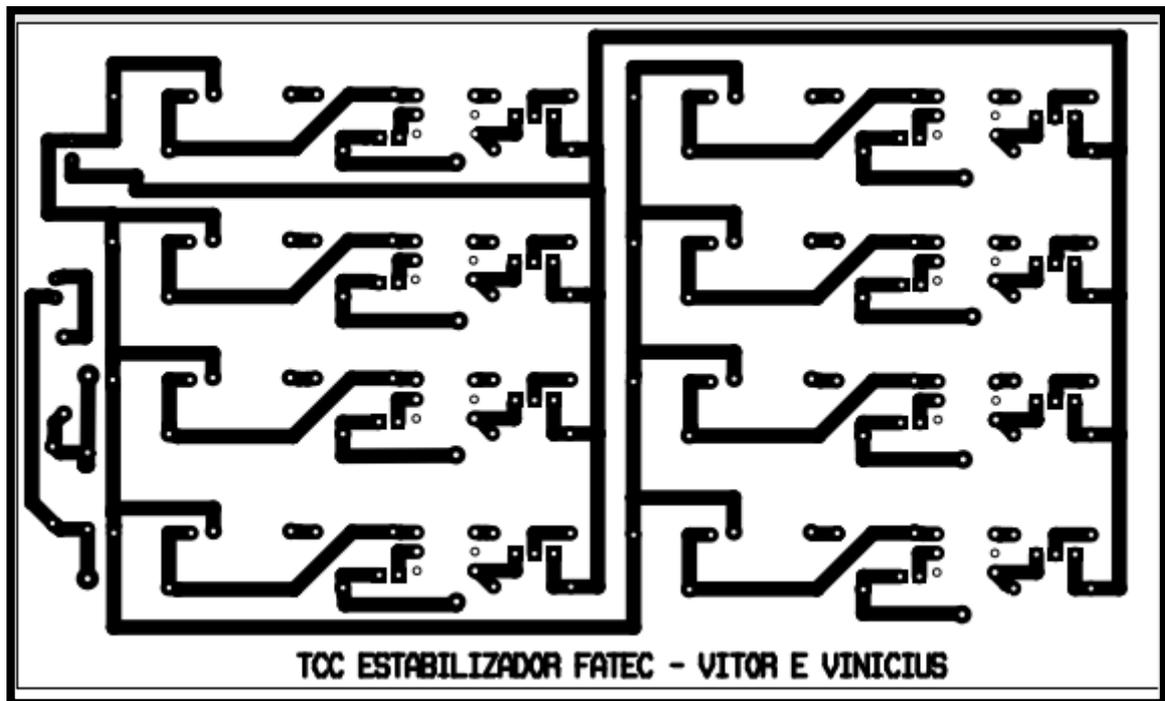
```
case 7: ativarSaida(0,0,0,0,0,1,1,1); break;
case 8: ativarSaida(0,0,0,0,1,0,0,0); break;
case 9: ativarSaida(0,0,0,0,1,0,0,1); break;
case 10: ativarSaida(0,0,0,0,1,0,1,0); break;
case 11: ativarSaida(0,0,0,0,1,0,1,1); break;
case 12: ativarSaida(0,0,0,0,1,1,0,0); break;
case 13: ativarSaida(0,0,0,0,1,1,0,1); break;
case 14: ativarSaida(0,0,0,0,1,1,1,0); break;
case 15: ativarSaida(0,0,0,0,1,1,1,1); break;
default:
    if(x2>15)
        ativarSaida(0,0,0,0,1,1,1,1);
    else if(x2<-15)
        ativarSaida(1,1,1,1,0,0,0,0);
    break;
}
```

APÊNDICE B – Esquemático

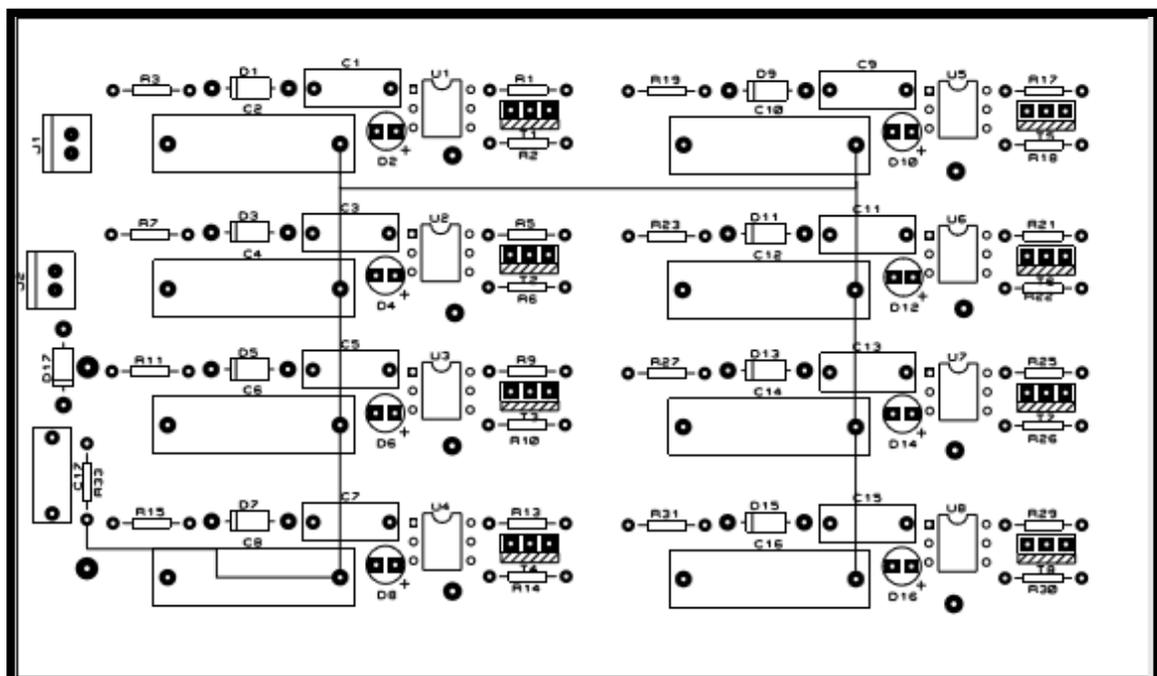


APÊNDICE C – PCB (*Printed Circuit Board*)

Bottom Copper

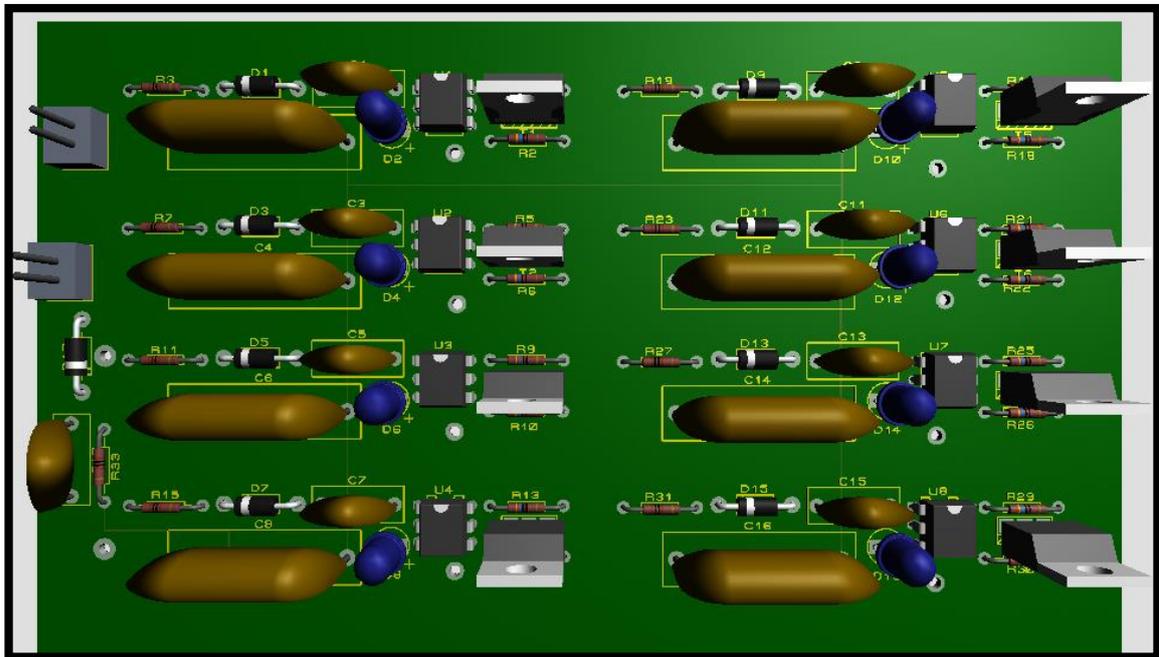


Top Silk



3D Visualizer

Top View



Bottom View

