

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Angelo Jacoboski

AUTOTRANSFORMADOR REGULADOR DE TENSÃO  
MONOFÁSICO

Passo Fundo

2018

Angelo Jacoboski

# AUTOTRANSFORMADOR REGULADOR DE TENSÃO MONOFÁSICO

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Rodrigo Siqueira Penz.

Passo Fundo

2018

Angelo Jacoboski

**Autotransformador regulador de tensão monofásico**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Rodrigo Siqueira Penz.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Me. Rodrigo Siqueira Penz - UPF

---

Prof. Me. Edson Acco - UPF

---

Prof. Me. Sérgio Bordignon - UPF

Este trabalho é dedicado a minhas irmãs, Estela, Leila e Lucilene, a meus queridos sobrinhos, Paola, Gustavo e Analu, a meus cunhados, Géder e Edson Mauro, a meu sogro Alfredo de Souza Leite, a minha sogra Clemires Fontana Leite e principalmente a meus pais, Mario e Maria e a minha noiva Janaína.

“Quem acredita sempre alcança”.

Renato Russo

## RESUMO

A regulação de tensão vem sendo um dos principais problemas no que diz respeito a redes elétricas de distribuição. Com o grande avanço das tecnologias, aliado ao maior poder de compra dos consumidores, bem como, com os programas de Universalização e Luz Para Todos, os sistemas elétricos acabaram por tornar-se defasados, visto que, houve um enorme aumento da demanda, tanto por acréscimos de cargas, quanto por acréscimos de novas unidades consumidoras. Os sistemas de distribuição também evoluíram consideravelmente, através de novos equipamentos e novas formatações de redes, contudo, a grande maioria desses avanços é utilizada apenas de maneira macro, ou seja, em redes trifásicas troncais. Vale ressaltar que, uma grande parte das redes existentes são monofásicas, principalmente nas zonas rurais. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta o projeto dimensionamento e desenvolvimento de maneira experimental e laboratorial, de um sistema de regulação de tensão monofásico automático e eficaz, de baixo custo, com baixo consumo de energia elétrica, e com elevada robustez. A regulação deste, é obtida, através da modificação da relação de transformação ( $\alpha$ ), de um autotransformador, de núcleo toroidal, com chapas de aço silício de Grão orientado. Este, deve realizar uma elevação de tensão de 21V sobre carga, quando a rede sofrer uma redução abaixo de 203V.

Palavras-Chave: Regulação de tensão, autotransformador, toroidal.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)	16
Quadro 2 – Classificações das Variações de Curta Duração	17
Figura 1 – Sistema MRT	19
Figura 2 – Esquema de ocorrência de queda de tensão no sistema elétrico	20
Figura 3: Triângulo de Potências com variação de reativos	22
Fotografia 1: Banco de capacitores em rede de distribuição	24
Figura 4: Autotransformador com elevação de tensão	25
Figura 5: Autotransformador com redução de tensão	25
Figura 6: Localização típica de RTs em redes de distribuição	26
Figura 7: Circuito monofásico de BT	27
Figura 8: Incremento de tensão de <i>tap</i> a cada passo	28
Fotografia 2: Banco de Reguladores de Tensão	29
Figura 9: Circuito magnético elementar de um transformador monofásico	30
Figura 10: Transformador trifásico de distribuição	31
Figura 11: Transformador bifásico	31
Figura 12: Transformador monobucha (MRT)	32
Figura 13: Configurações de autotransformadores	35
Figura 14: Utilização do campo magnético	36
Figura 15: Curva de perdas magnéticas em GNO	37
Figura 16: Curva de perdas magnéticas em GO	38
Figura 17: Faixas de Tensão do PRODIST	40
Figura 18: Diagrama de blocos do projeto	40
Figura 19: Operação do sistema	41
Figura 20: Circuito condicionador da tensão de referência	42
Figura 21: Circuito ceifador	43
Figura 22: Circuito detector de pico	43
Figura 23: Comparativo da tensão de rede x tensão reduzida em 3 níveis diferentes	44
Figura 24: Linearidade da tensão reduzida	44
Figura 25: Circuito comparador de tensão com histerese	45
Figura 26: Gráfico de histerese	45
Figura 27: Comprovação da histerese na redução de tensão	46

Figura 28: Comprovação da histerese na redução de tensão	47
Figura 29: Comprovação da histerese no aumento da tensão	47
Figura 30: Comprovação da histerese no aumento da tensão	48
Figura 31: Circuito Lógico de atraso	49
Figura 32: Retardo da comutação projetado no circuito lógico	50
Figura 33: Retardo da comutação projetado no circuito lógico	50
Figura 34: Retardo na comutação do sistema com carga indutiva	51
Figura 35: Deslocamento DC da onda quadrada e <i>duty cycle</i>	52
Figura 36: Circuito gerador de <i>clock</i>	52
Figura 37: Onda senoidal da rede em sincronismo com o <i>clock</i>	53
Figura 38: Circuito de potência com MOC e TRIACs	54
Figura 39: Circuito de potência com transistores e relés	55
Figura 40: Atraso no fechamento de RL2	57
Figura 41: Configuração do autotransformador projetado	61
Figura 42: Circuito de alimentação	62
Figura 43: Estabilidade do circuito de alimentação	64
Figura 44: Tensão em faixa crítica regulada para faixa adequada com carga R	65
Figura 45: Tensão no limite superior antes da comutação com carga R	66
Figura 46: Tensão sobre a carga alimentada apenas através da bobina secundária do autotransformador com carga R	67
Figura 47: Sobretensão absorvida pelo secundário do autotransformador com carga R	67
Figura 48: Comutação do Protótipo com carga R	68
Figura 49: Tensão no limite superior antes da comutação com carga RL	69
Figura 50 Tensão sobre a carga RL alimentada apenas através da bobina secundária do autotransformador com carga RL	69
Figura 51: Sobretensão absorvida pelo secundário do autotransformador com carga RL	70
Figura 52: Ajuste de tensão no autotransformador com carga RL	70
Figura 53: Tensão no limite superior antes da comutação com carga RC	71
Figura 54: Sobretensão absorvida pelo secundário do autotransformador com carga RC	72
Figura 55: Ajuste de tensão no autotransformador com carga RC	72
Quadro 3: Ajustes de tensão do sistema	73
Figura 56: Gráfico de ajustes do sistema	73

## LISTA DE ABREVIATURAS

CC – Corrente Contínua

CA – Corrente Alternada

TR – Transformador

LT – Linha de Transmissão

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

VTCD – Variação de Tensão de Curta Duração

MT – Média Tensão

BT – Baixa Tensão

RD – Rede de Distribuição

CNAE – Conselho Nacional de Águas e Energia

DNAE – Departamento Nacional de Águas e Energia

DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

PND – Plano Nacional de Desestatização

ONS – Operador Nacional do Sistema

SIN – Sistema Integrado Nacional

LPT – Luz Para Todos

DRP – Duração Relativa da Transgressão para tensão Precária

DRC – Duração Relativa da Transgressão para tensão Crítica

MRT – Monofilar com Retorno por Terra

FP – Fator de Potência

RT – Regulador de tensão

GO – Grão Orientado

GNO – Grão Não Orientado

DPS – Dispositivo de Proteção contra Surtos de tensão

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 OBJETIVOS GERAIS .....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
1.3 JUSTIFICATIVA .....	13
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>15</b>
2.1 LEGISLAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO.....	15
<b>2.1.1 Qualidade de Energia Elétrica .....</b>	<b>16</b>
2.1.1.1 <i>Tensão em Regime Permanente</i> .....	16
2.1.1.2 <i>Variações de Tensão de Curta Duração</i> .....	17
2.2 REDES DE DISTRIBUIÇÃO .....	18
<b>2.2.1 Sistema Monofilar com Retorno por Terra (MRT) .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2 Queda de tensão em redes de distribuição .....</b>	<b>20</b>
2.3 CORREÇÃO DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO .....	22
<b>2.3.1 Bancos de capacitores.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.2 Bancos de reguladores de tensão .....</b>	<b>24</b>
2.3.2.1 <i>Localização em redes de distribuição</i> .....	25
2.3.2.2 <i>Tipos de reguladores e comutação</i> .....	27
2.3.2.3 <i>Associação de reguladores</i> .....	29
<b>2.3.3 Transformadores de potência.....</b>	<b>30</b>
2.3.3.1 <i>Comutação em transformadores de distribuição</i> .....	32
<b>2.3.4 Cabos .....</b>	<b>33</b>
2.4 AUTOTRANSFORMADORES.....	34
2.5 NÚCLEOS MAGNÉTICOS .....	36
<b>3 DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>39</b>

3.1 CIRCUITO CONDICIONADOR DA TENSÃO DE REFERÊNCIA .....	41
<b>3.1.1 Transformador do circuito condicionador da tensão de referência .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1.2 Circuito ceifador .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1.3 Circuito detector de pico .....</b>	<b>43</b>
3.2 CIRCUITO DE COMPARAÇÃO.....	44
3.3 CIRCUITO LÓGICO .....	48
3.4 CIRCUITO GERADOR DE ONDA QUADRADA .....	51
3.5 CIRCUITO DE POTÊNCIA .....	53
3.6 PROJETO DO AUTOTRANSFORMADOR .....	58
<b>3.6.1 Dimensionamento do núcleo .....</b>	<b>59</b>
<b>3.6.2 Dimensionamento dos condutores de cobre .....</b>	<b>60</b>
3.7 FONTE CC PARA OS COMPONENTES ELETRÔNICOS .....	62
<b>3.7.1 Transformador do circuito de alimentação.....</b>	<b>62</b>
<b>3.7.2 Circuito de alimentação .....</b>	<b>62</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>
4.1 ENSAIO COM CARGA RESISTIVA .....	65
4.2 ENSAIO COM CARGA RESISTIVA INDUTIVA .....	68
4.3 ENSAIO COM CARGA RESISTIVA CAPACITIVA.....	71
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>74</b>
5.1 DIFICULDADES NA ELABORAÇÃO DO PROJETO .....	75
5.2 SUGESTÕES PARA MELHORIA DO PROJETO.....	75
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>76</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em meados de 1880 a energia elétrica começou a se fazer presente no Brasil e desde então, os sistemas elétricos vêm sofrendo mudanças. “Inicialmente em corrente contínua (CC), a tensão de distribuição e de entrega aos consumidores era a mesma, desde a geração até o consumo” (AZEVEDO, 2010, p.16). Anos depois, já em corrente alternada (CA), os sistemas passaram a operar com tensões mais elevadas e foram instalados os primeiros transformadores (TR), o que tornou possível abranger regiões maiores. Posteriormente, com a construção de grandes usinas hidrelétricas e termoeletricas, se tornou necessário a implantação de Linhas de Transmissão (LT), que operam em altas tensões. Atualmente a energia passa por diversas transformações até chegar ao consumidor final.

Em um país com dimensões continentais, com muitas florestas e regiões acidentadas, não é difícil encontrar grandes extensões de redes de distribuição monofásicas, principalmente nas zonas rurais. Estas redes monofásicas foram, e continuam sendo construídas devido ao baixo custo de implantação, facilidade de construção e manutenção. Porém, com a rápida evolução tecnológica e a incorporação de novas cargas pelos consumidores, começaram a surgir os problemas de queda de tensão, prejudicando o adequado funcionamento dos equipamentos, principalmente os eletrônicos e os motores, que poderão inclusive ter a sua vida útil reduzida. Neste sentido, é que se fazem necessárias as normas para os níveis de tensões que são entregues aos consumidores.

Devido à grande necessidade de sistemas e subsistemas elétricos, foi criada em 1996, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que é o órgão responsável pela regulação do Setor Elétrico Brasileiro. Essa regulação é realizada através de Resoluções Normativas, às quais vem se tornando cada vez mais rigorosas para as concessionárias de energia elétrica. Tais resoluções têm como principal objetivo fazer com que os consumidores recebam a energia elétrica dentro dos parâmetros de qualidade estabelecidos nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

O PRODIST é dividido em 11 módulos, o módulo 8 estabelece os procedimentos relacionados a qualidade da energia elétrica (QEE). Entre vários índices, esse módulo define os limites para tensão em regime permanente, que devem ser fornecidos no ponto de conexão da distribuidora com a unidade consumidora, sendo que esta tensão de fornecimento é classificada como adequada ou precária, ou ainda crítica. O módulo 8 também delimita as variações de tensão de curta duração (VTCD), que são as variações no valor eficaz da tensão em um intervalo de tempo inferior a 3 minutos. O descumprimento dessas normas é

penalizado com a aplicação de multas, sendo estas, descontadas diretamente nas faturas dos clientes prejudicados.

Atualmente, as regulações de tensão são realizadas com a utilização de bancos de capacitores e bancos reguladores de tensão, entretanto, ambos são instalados em redes de média tensão (MT) trifásicas e executam uma única correção de tensão a jusante do ponto onde foram instalados. Ainda, para redes de MT e baixa tensão (BT) monofásicas, uma solução utilizada para estabilização da tensão é o aumento das bitolas dos condutores e o encurtamento dos circuitos de BT.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Projetar um sistema de regulação de tensão eficaz e economicamente viável para solucionar os problemas de queda de tensão de consumidores monofásicos, principalmente quando estes são atendidos por extensas redes de baixa tensão e ou transformadores sobrecarregados, ou ainda, em instalações internas distantes do ponto de conexão com a concessionária.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender a legislação do setor elétrico Brasileiro, especialmente no que tange aos níveis de tensão entregues aos consumidores;
- Pesquisar sobre os sistemas de regulação de tensão utilizados pelas concessionárias de distribuição do Brasil, equipamentos utilizados e o funcionamento dos mesmos;
- Projetar um autotransformador regulador de tensão monofásico de comutação automática;
- Realizar os ensaios com diversos tipos de cargas, ou seja, resistiva, indutiva e capacitiva, observando o tempo de comutação e a tensão entregue a carga;

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Com o passar dos anos a ANEEL vem se tornando cada vez mais rigorosa nas questões de QEE entregue aos consumidores, atualmente exige que as concessionárias forneçam

energia elétrica de ótima qualidade, ou seja, atendendo aos requisitos constantes no Módulo 8 do PRODIST.

Paralelo a isto, os consumidores passaram a adquirir várias novas cargas, essas acabaram por sobrecarregar os transformadores e também, por aumentar as quedas de tensões nas extremidades das redes de baixa tensão.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

- Neste capítulo introdutório, foi apresentada uma abordagem geral do trabalho, contextualizando os principais anseios no desenvolvimento deste;
- No segundo capítulo, aprofundam-se os conhecimentos da legislação do setor elétrico Brasileiro, principalmente com relação a QEE e os parâmetros de variações de tensão aceitáveis. Abordam-se também, as características de funcionamento das redes de distribuição (RD) e suas perdas, além dos bancos de capacitores, bancos reguladores de tensão e transformadores que são os equipamentos de regulação mais utilizados em RD, por fim, são abordados os cabos, os autotransformadores e os núcleos magnéticos;
- No terceiro capítulo será apresentado um delineamento inicial do projeto, os blocos que o compõem, e uma descrição breve dos mesmos;
- No quarto e último capítulo, serão descritas as considerações finais do projeto;

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 LEGISLAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

Em 1903 foi aprovado pelo Congresso Nacional o primeiro texto de lei com regras para o uso de energia elétrica. Já, em 1934, o poder público passou a poder controlar as concessionárias de energia elétrica e, logo depois, em 1939 foi criado o Conselho Nacional de Águas e Energia, o CNAE, com objetivo de garantir o suprimento, regulamentar e controlar as tarifas. O próximo passo foi a criação da Eletrobrás em 1961, que passaria a controlar o setor elétrico Brasileiro. Na sequência, em 1965, foi criado o DNAE, Departamento Nacional de Águas e Energia que anos depois passaria a se chamar DNAEE.

Com a chegada dos anos 90, chegou também a primeira grande mudança no setor elétrico, onde foi sancionada pelo Presidente Fernando Collor de Mello a lei nº. 8.031, que tratava do Programa Nacional de Desestatização, o PND, tornando as privatizações um dos maiores marcos na história do setor elétrico, pois com a injeção de capital privado, as concessionárias passaram a fornecer energia com mais qualidade. Através da lei nº 9.427 de dezembro de 1996 foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que desde então passou a ser a principal responsável pelas regulamentações do setor. Junto com a ANEEL, foi constituído também o Operador Nacional do Sistema (ONS), que é o responsável pela coordenação e controle das instalações geradoras e transmissoras de energia elétrica do Sistema Integrado Nacional (SIN)(ELETROBRÁS, 2012).

A segunda grande mudança ocorreu com a introdução de uma nova metodologia para promover a modicidade tarifária, mas principalmente pela inserção social, através do programa de Universalização, estabelecido pela lei nº. 10.438, de 26 de abril de 2002. Através dessa lei, qualquer solicitante do Grupo B, com carga instalada inferior a 50kW, passou a ter direito ao serviço público de energia elétrica sem qualquer ônus pela instalação deste. Com o passar dos anos, dentro do programa de Universalização, surgiu o Luz Para Todos (LPT), que visava contemplar consumidores rurais, com a construção do quadro de medição e inclusive a instalação elétrica interna da residência. Desde 2010, as condições gerais de fornecimento são estabelecidas pela Resolução Normativa ANEEL nº 414(ELETROBRÁS, 2012).

Por se tratar de um serviço público, onde o cliente ainda não tem outra opção de escolha para seu atendimento, a ANEEL criou o PRODIST, que dentre outros regulamentos, tem por objetivo garantir a continuidade do fornecimento e a qualidade do produto entregue aos consumidores.

### 2.1.1 Qualidade da energia elétrica

O Módulo 8 do PRODIST, é a norma encarregada por tratar da qualidade do produto em regime permanente ou em regime transitório, no que diz respeito aos seguintes fenômenos: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência e VTCD.

Essa normativa define também, os parâmetros, valores de referência ou limites mínimos da qualidade do produto, estabelece o método de medição da qualidade do produto, define os processos administrativos das reclamações dos clientes além de descrever os estudos da qualidade do produto.

No sentido de regulação de tensão, onde o desejado é fornecer a tensão ao consumidor com a menor variação possível de seu valor nominal, verificam-se anomalias em regime permanente e VTCD.

#### 2.1.1.1 Tensão em regime permanente

Para o controle desses fenômenos, foram definidos no PRODIST, os valores limites para a tensão ser considerada adequada, precária ou crítica, onde esses valores ficam em torno da tensão de referência planejada do sistema de distribuição, de maneira que seja compatível com os equipamentos elétricos dos consumidores. No Quadro 1 são apresentadas as faixas de tensão adequadas, precárias e críticas para a tensão nominal de 380/220V.

Quadro 1: Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)

<b>Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)</b>
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403) / (191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: PRODIST – Módulo 8

A fim de assegurar o nível de tensão de fornecimento, as concessionárias devem acompanhar constantemente todo o seu sistema de distribuição e atuar de maneira preventiva, investindo em novas tecnologias para manter os padrões adequados.

Existindo violações da tensão em regime permanente e conseqüentemente dos índices de duração relativa da transgressão para a tensão precária (DRP) e para a tensão crítica

(DRC), a distribuidora deverá compensar seus consumidores, inclusive os demais conectados ao mesmo ponto de conexão com a distribuidora. Essa compensação deverá ser efetuada diretamente na fatura do consumidor, e deverá ser mantida enquanto o DRP ou DRC estiverem abaixo das especificações.

### 2.1.1.2 Variações de Tensão de Curta Duração

Segundo o PRODIST – Módulo 8: VTCDs são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a 3 minutos. As mesmas são classificadas conforme indicação do Quadro 2:

Quadro 2: Classificações das Variações de Curta Duração

<b>Classificação</b>	<b>Denominação</b>	<b>Duração da Variação</b>	<b>Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência</b>
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: PRODIST – Módulo 8

As causas mais comuns das referidas variações são as descargas atmosféricas, contatos com animais, vendavais, problemas em equipamentos de distribuição, galhos sobre a rede, curtos-circuitos em qualquer ponto da rede. Também, os problemas podem estar nas cargas dos consumidores, como a utilização de fornos a arco, máquinas de solda, ou na partida de

grandes cargas indutivas, no caso, grandes motores, que apresentam uma corrente de partida de até 8 vezes o valor da corrente nominal.

As VTCDs podem causar vários problemas aos consumidores, em indústrias, podem fazer com que equipamentos interrompam o seu funcionamento, causando grandes prejuízos, em equipamentos com microprocessadores, que são extremamente susceptíveis a distúrbios de tensão, pois trabalham em altíssimas frequências. Além desses problemas, podem causar o fenômeno de cintilação (Flicker), que são variações na luminosidade das lâmpadas, essas podem causar desconforto visual, dores de cabeça, dentre outros.

## 2.2 REDES DE DISTRIBUIÇÃO

As redes de distribuição (RD) são sistemas compostos por postes, condutores, transformadores, reguladores, capacitores, isoladores, equipamento de proteção, de manobra entre outros tantos. As RDs nascem nas subestações, as quais recebem alta tensão através das LTs, e são rebaixadas por transformadores, transformando-as em média tensão, normalmente de 13,8kV ou 23,1kV. A partir dessa tensão são instalados os transformadores de distribuição, que rebaixam de média tensão para baixa tensão, usualmente 230/115V, 220/127V ou 380/220V.

No Brasil são utilizados basicamente 4 tipos de redes de distribuição:

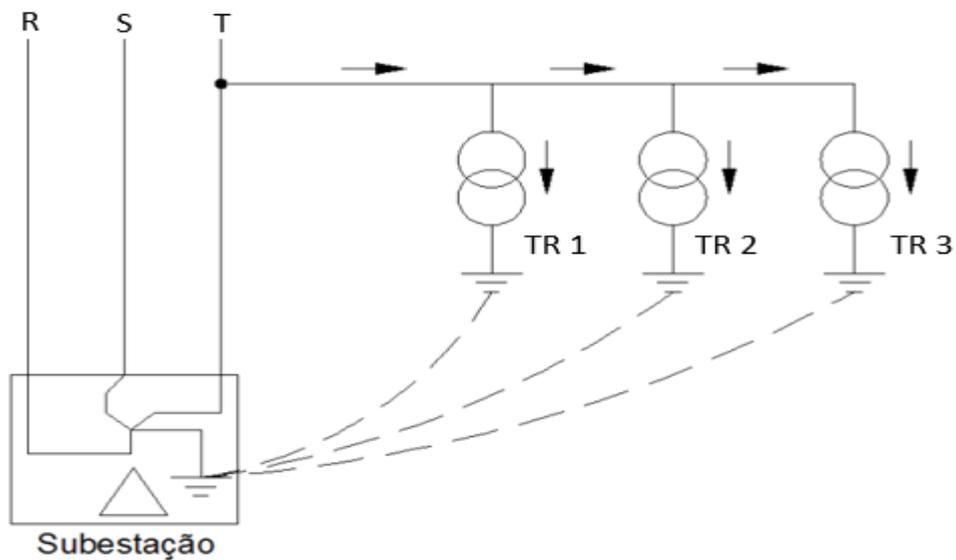
- Redes de distribuição aéreas nuas de MT e BT, utilizam-se de condutores nus, e existem no formato trifásico, bifásico e monofásico;
- Redes de distribuição aéreas compactas de MT, são construídas por condutores cobertos (não isolados) que são dispostos em formato losangular, exceto as redes monofásicas;
- Redes de distribuição aéreas isoladas de BT, são compostas por condutores isolados trançados;
- Redes de distribuição subterrâneas isoladas de MT e BT, utilizam-se de condutores isolados, pouco utilizada no Brasil devido aos altíssimos custos de implementação;

Dentro desse contexto, a seguir será abordado o sistema MRT.

### 2.2.1 Sistema Monofilar com Retorno por Terra (MRT)

Dentro dos sistemas de distribuição, grande parte das redes ainda são monofásicas do tipo Monofilar com Retorno por Terra (MRT). Nesse sistema, “o solo exerce a função de condutor de retorno da corrente do primário do transformador monofásico de distribuição até a subestação de origem da rede”, como demonstrado na Figura 1 (SILVA, 2015, p. 3).

Figura 1: Sistema MRT



Fonte: (SILVA, 2015, p. 3)

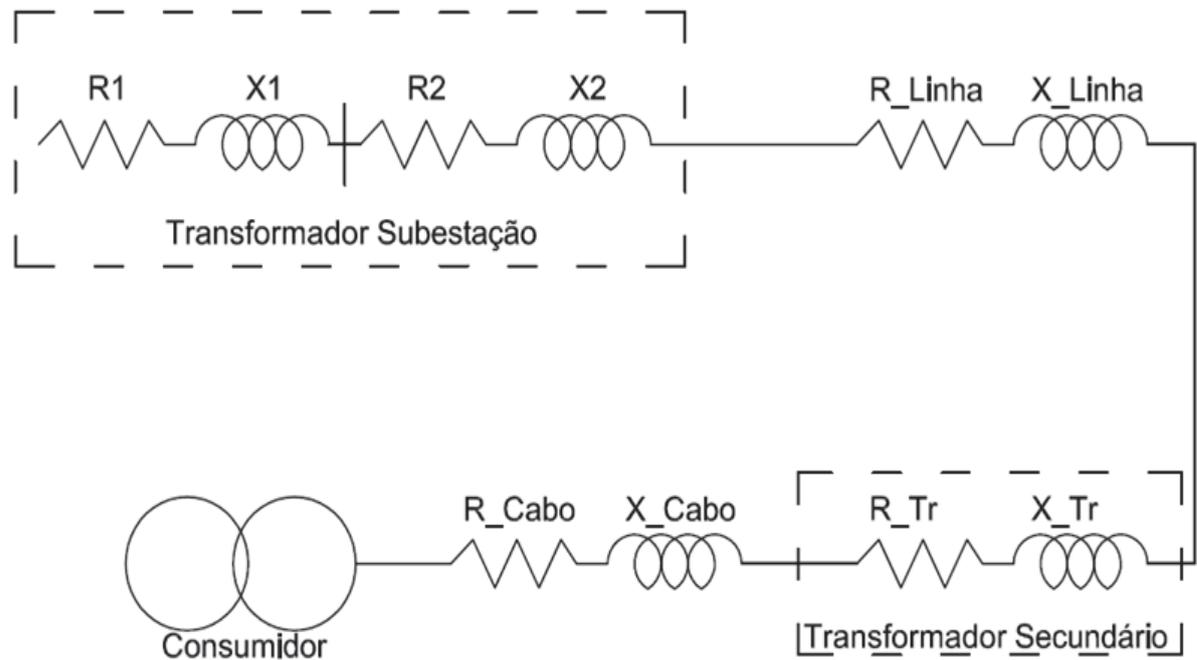
Como nesse tipo de sistema, onde a corrente flui constantemente para a terra, o aterramento requer uma atenção especial, pois deve ter um valor de resistência o mais baixo possível. Em algumas regiões isso pode ser um grande problema devido à alta resistividade do solo. Em alguns casos, a resistência pode ser reduzida com a utilização de produtos químicos, porém, o mais comum é aumentar o número e ou tamanho de hastes de aterramento. Além de garantir o correto funcionamento do sistema, um bom aterramento de sistema MRT também garante a segurança das pessoas e animais que venham a circular nas proximidades (SILVA, 2015).

Em um contexto geral, as redes MRT são boas opções para o atendimento de consumidores de áreas rurais com pequenas cargas, por possuírem baixo custo de implementação e manutenção, porém com o Programa de LPT as extensões desse tipo de rede aconteceram sem o devido planejamento, e estas passaram a ter grandes extensões e, conseqüentemente, em seus extremos passaram a ocorrer elevadas quedas de tensão.

## 2.2.2 Queda de tensão em redes de distribuição

Para iniciar este estudo, é necessário analisar o esquema elétrico da Figura 2 e equacionar os cálculos de queda de tensão do mesmo.

Figura 2: Impedâncias do sistema elétrico



Fonte: (SANTOS, 2013 apud ROCHA)

Primeiramente é necessário definir a impedância equivalente, assim, define-se inicialmente a resistência equivalente ( $R_{eq}$ ) através da Equação 1:

$$R_{eq} = R1 + R2 + R_{Linha} + R_{Tr} + R_{Cabo} \quad (1)$$

Onde:

$R1$  = Resistência do enrolamento primário do TR da subestação ( $\Omega$ );

$R2$  = Resistência do enrolamento secundário do TR da subestação ( $\Omega$ );

$R_{Linha}$  = Resistência da rede MT ( $\Omega$ );

$R_{Tr}$  = Resistência do TR de distribuição ( $\Omega$ );

$R_{Cabo}$  = Resistência da rede BT ( $\Omega$ );

Em seguida define-se a reatância equivalente ( $X_{eq}$ ) através da Equação 2:

$$X_{eq} = X1 + X2 + X_{Linha} + X_{Tr} + X_{Cabo} \quad (2)$$

Onde:

$X1$  = Reatância do enrolamento primário do TR da subestação ( $\Omega$ );

$X2$  = Reatância do enrolamento secundário do TR da subestação ( $\Omega$ );

$X\_Linha$  = Reatância da rede MT ( $\Omega$ );

$X\_Tr$  = Reatância do TR de distribuição ( $\Omega$ );

$X\_Cabo$  = Reatância da rede BT ( $\Omega$ );

Agora é possível obter a expressão da impedância equivalente ( $Z_{eq}$ ) pela Equação 3:

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \quad (3)$$

Dispondo da impedância equivalente e da corrente da carga ( $I_{carga}$ ), pode-se calcular a queda de tensão ( $V_q$ ) para o sistema, através da Equação 4:

$$\vec{V}_q = \overline{I_{carga}} \times \vec{Z}_{eq} \quad (4)$$

Conhecendo a queda de tensão em um trecho do sistema elétrico, é possível determinar o valor da tensão no final do circuito através da Equação 5:

$$\vec{V}_c = \vec{V}_f - \vec{V}_q \quad (5)$$

Onde:

$V_f$  = Tensão na fonte;

$V_c$  = Tensão no consumidor;

Certamente, trata-se de um dos principais problemas das redes elétricas de distribuição, problemas esses que se agravaram muito nos últimos anos, devido ao grande aumento das cargas utilizadas pelos consumidores, e também, pela enorme quantidade de novos clientes ligados através do programa de Universalização. Todo esse aumento acabou por deixar os sistemas de distribuição defasados, com redes extremamente compridas, com condutores de baixa secção transversal, além de transformadores de distribuição sobrecarregados. O fator de potência (FP) baixo, causado pela grande quantidade de cargas indutivas, também contribui para o sobre carregamento das redes de distribuição e conseqüentemente o aumento da queda de tensão.

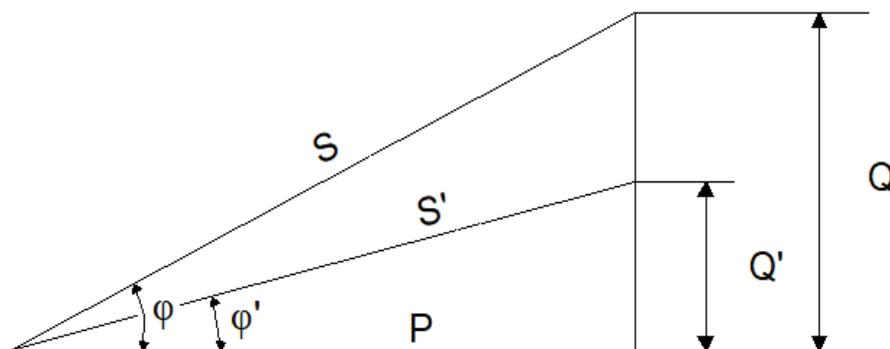
Existem diversos recursos para a correção dos níveis de tensão nas redes de distribuição, sejam eles, os Bancos de Capacitores, reguladores de tensão e os transformadores. Na sequência, vamos explicar como estes auxiliam na regulação de tensão.

## 2.3 CORREÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

### 2.3.1 Bancos de capacitores

A energia elétrica necessária para o funcionamento de cargas indutivas ou capacitivas é formada por duas componentes, a componente ativa e a reativa. A componente de potência ativa é a responsável por realmente realizar o trabalho (P), já a componente de potência reativa (Q), apesar de não realizar trabalho, é a energia responsável por gerar campos eletromagnéticos necessários para o funcionamento de motores e transformadores dentre outros. A soma vetorial da potência ativa e reativa é chamada de potência aparente (S), que é a potência total absorvida da rede. Através a Figura 3 é possível verificar que, com a variação da potência reativa, a potência aparente e o ângulo  $\varphi$  também variam.

Figura 3: Triângulo de Potências com variação de reativos



Fonte: Adaptado de (FRAGOAS, 2008, p. 14)

As redes de distribuição, geralmente possuem altos níveis de reativos, que são provocados na maioria das vezes por motores, transformadores, grandes números de reatores utilizados em lâmpadas, máquinas de solda a transformador, dentre tantos outros. Ainda, com base na Figura 3, com essa grande quantidade de reativos indutivos ligados à rede, o ângulo  $\varphi$  aumenta e conseqüentemente o FP diminui.

O FP caracteriza-se por ser a defasagem entre a onda senoidal da tensão e a da corrente. Se a onda da corrente está atrasada com relação a tensão, o FP é indutivo, do contrário se diz

que o FP é capacitivo. O cálculo do FP pode ser realizado através do cosseno  $\varphi$  formado entre a potência ativa e a potência aparente, ou pela relação entre a potência ativa e a potência aparente, conforme a Equação 6.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (6)$$

Onde:

FP = Fator de potência;

P = Potência Ativa;

S = Potência Aparente;

De acordo com a Resolução Normativa nº. 414 da ANEEL, o FP mínimo aceitável é 0,92 indutivo ou capacitivo. Para o controle desses FPs, as concessionárias e os consumidores inserem e retiram capacitores do sistema elétrico.

Os Bancos de capacitores são utilizados em redes de distribuição com o objetivo principal de melhorar o FP, a partir do ponto de sua instalação, em direção a fonte, ou seja, compensar os reativos produzidos pelas cargas indutivas. Assim, quando bem dimensionado e instalado em local adequado reduz as quedas de tensão. Isto, deve-se ao fato que, com a redução de reativos trocados com a fonte, também ocorre redução da corrente da fonte sobre os condutores (BURATTI, 2016).

Os Bancos de capacitores podem ser utilizados com controle automático, semiautomático ou sem controle:

- Os capacitores com controle automático variam a quantidade de células em operação automaticamente com a variação do FP.
- Os semiautomáticos utilizam-se de *timers*, ou seja, são programados para permanecerem ligados nos horários de maior demanda e desligados nos horários de menor demanda;
- Os Bancos de Capacitores fixo, funcionam 24 horas por dia, injetando energia reativa na rede, em horários de baixa carga pode causar sobretensões no sistema.

Outra informação importante é que os bancos podem ser ligados em diversas configurações, como estrela aterrado, estrela isolado, delta e dupla estrela isolada. Em todas as configurações podem haver capacitores em série ou em paralelo. A Fotografia 1 apresenta um banco de capacitores em rede de distribuição com ligação estrela aterrado.

Fotografia 1: Banco de capacitores em rede de distribuição

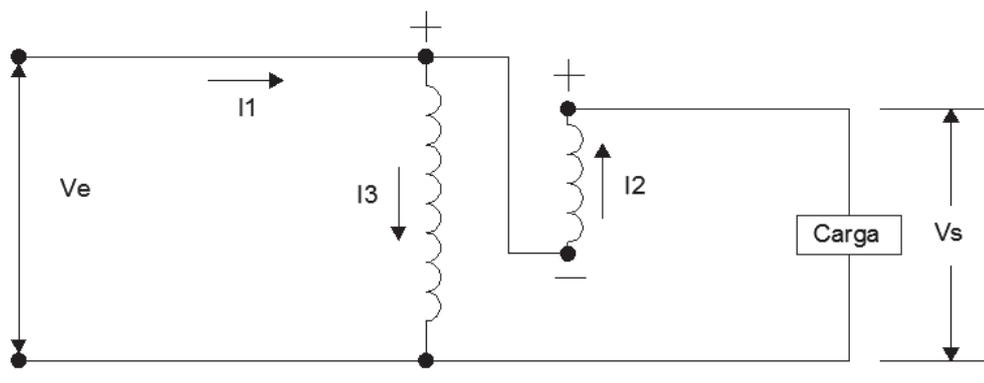


Fonte: Próprio autor

### 2.3.2 Banco de Reguladores de Tensão

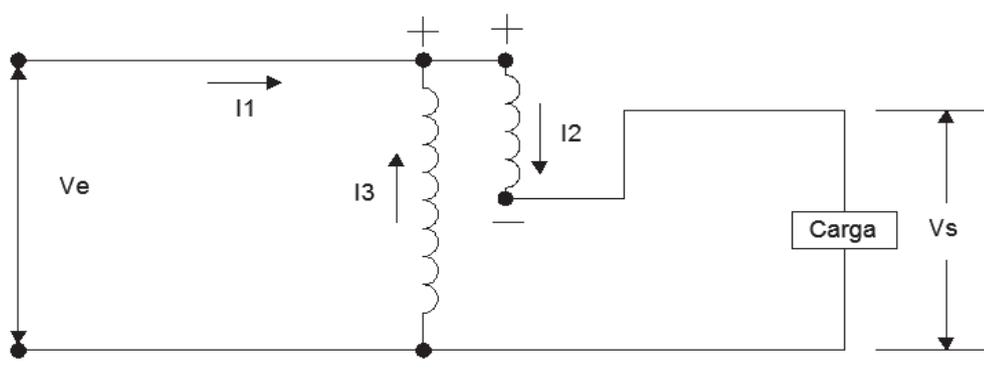
Reguladores de tensão (RT) são equipamentos utilizados para basicamente, manter a tensão de uma rede elétrica constante, ou, com pequenas variações dentro de limites estabelecidos. São basicamente autotransformadores, com um enrolamento em paralelo (shunt) e um enrolamento em série com a carga. O enrolamento série possui várias derivações (*tap's*), que possibilitam alterar a relação de transformação do mesmo. Os enrolamentos podem ser ligados com polaridade aditiva ou subtrativa como ilustram a Figura 4 e a Figura 5.

Figura 4: Autotransformador com elevação de tensão



Fonte: Adaptado de (MAMEDE, 2005, p. 663)

Figura 5: Autotransformador com redução de tensão



Fonte: Adaptado de (MAMEDE, 2005, p. 663)

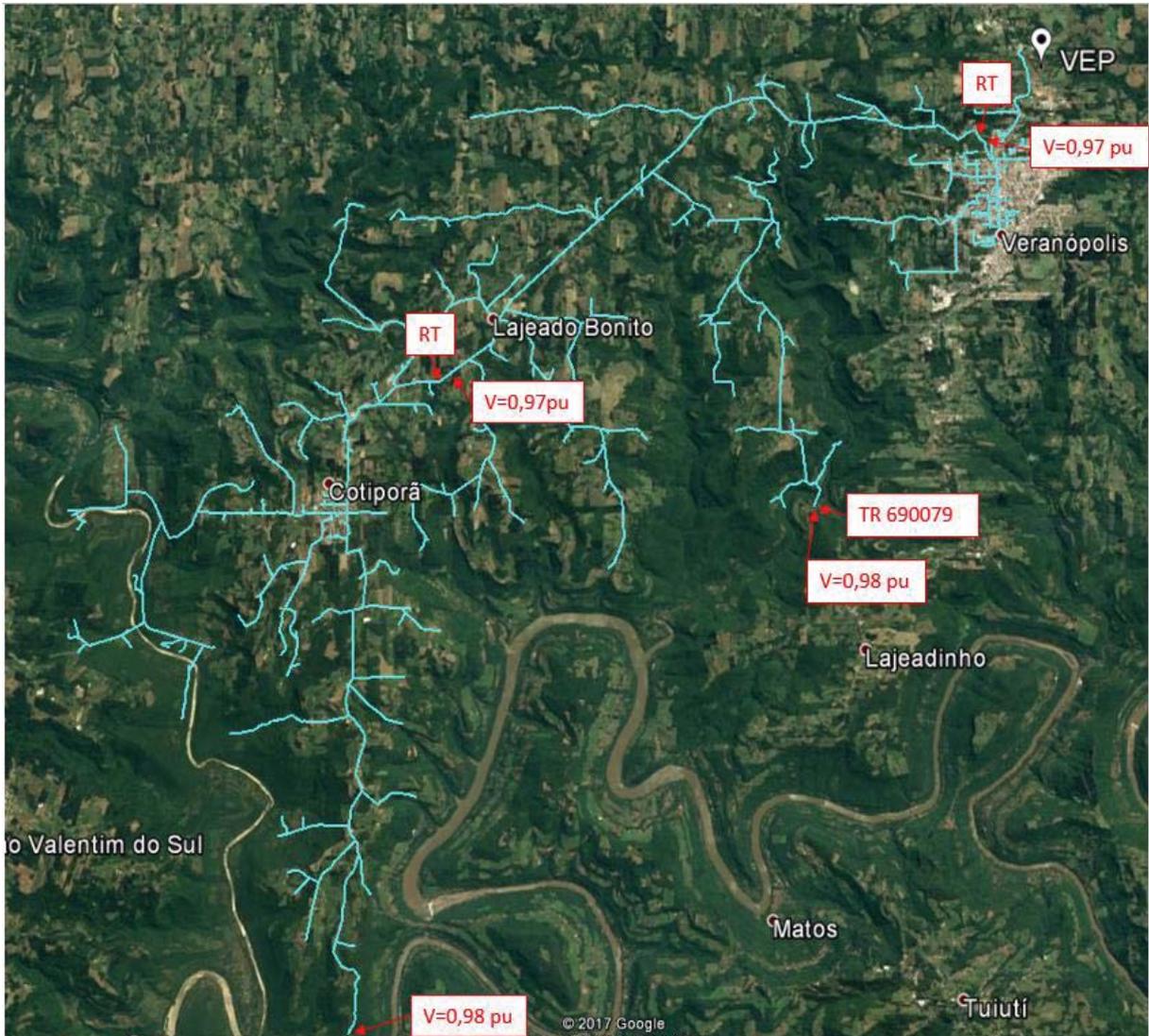
### 2.3.2.1 Localização em redes de distribuição

Os bancos reguladores de tensão são amplamente utilizados pelas concessionárias de energia elétrica, principalmente em alimentadores de grande extensão e normalmente em áreas rurais que não possuem grandes concentrações de cargas. São instalados em pontos estratégicos, a fim de reduzir consideravelmente a faixa de variação de tensão, contribuindo inclusive com o aumento do faturamento da Concessionária (BURATTI, 2016).

Os RTs ilustrados na Figura 6, estão localizados a 4,1 Km e, 18,6 km da subestação, respectivamente, em um alimentador de aproximadamente 80 km de extensão, com tensão nominal de 23,1kV e com carga instalada de 5MVA. Através do software Interplan, é possível verificar que, no primeiro RT, instalado após a cidade de Veranópolis, a tensão já se encontra em 0,97 pu, na continuação, após a primeira regulação e chegando ao segundo regulador, a

tensão encontra-se novamente em 0,97 pu, após o segundo regulador, e alcançando o extremo mais distante da subestação, se percebe uma tensão de 0,98 pu.

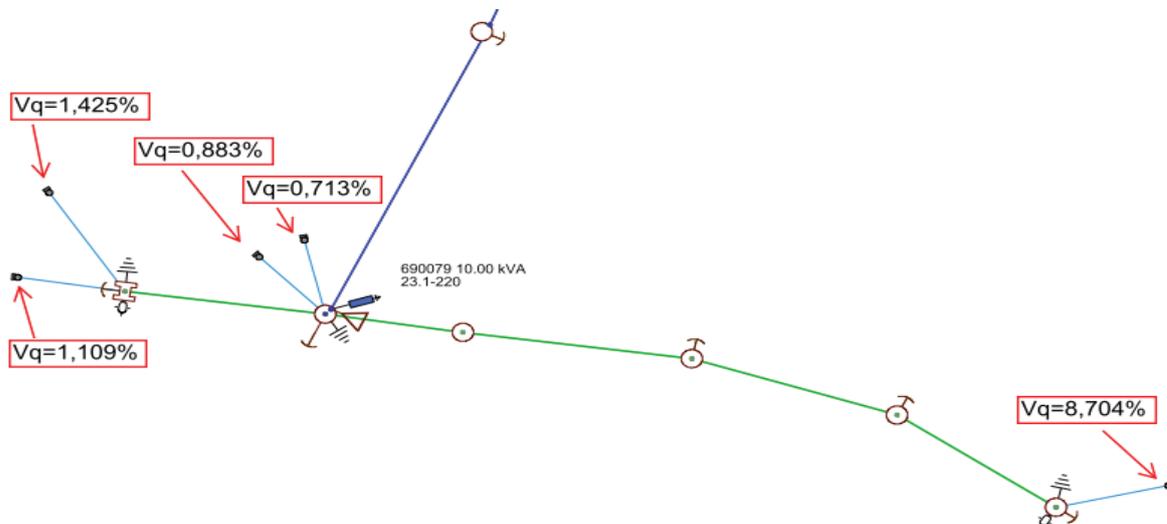
Figura 6: Localização típica de RT em rede de distribuição



Fonte: Próprio autor

Na Figura 7 é possível visualizar o circuito do transformador 690079, localizado conforme a Figura 6. Nesse circuito é possível observar no consumidor a direita, uma queda de tensão de 8,704%, ou seja, o consumidor está com uma tensão de 200,8V, dentro da faixa precária de tensão, entretanto para realização desse cálculo, foi utilizada a tensão nominal para a rede de MT, que na realidade já apresenta nesse ponto uma queda de tensão na ordem de 0,02 pu.

Figura 7: Circuito monofásico de BT



Fonte: Próprio autor

### 2.3.2.2 Tipos de reguladores e comutação

Existem basicamente, dois tipos de RTs para redes de distribuição, os reguladores auto booster e os reguladores de 32 degraus.

Os Auto booster, como são chamados, são fabricados em unidades monofásicas, e são equipamentos mais limitados se comparados aos de 32 degraus, pois podem realizar a correção da tensão em apenas um sentido, ou seja, o equipamento é elevador de tensão ou é abaixador de tensão, porém ambos são dotados de comutação automática.

Esse tipo de regulador vem perdendo espaço nas redes de distribuição, no entanto, quando utilizado, são instalados em extremidades de alimentadores muito extensos, com cargas relativamente baixas. Também, são usados para recuperar a tensão de alimentadores, por deficiência da tensão recebida na subestação, através das extremidades das LTs.

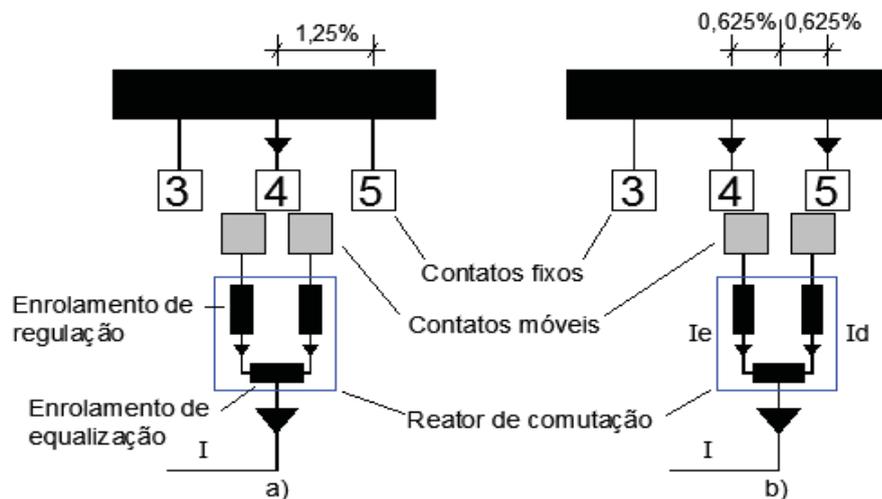
Os reguladores de 32 degraus usados em redes de distribuição, também são fabricados em unidades monofásicas, no entanto, são capazes de elevar e rebaixar a tensão automaticamente. Por possuírem 32 possibilidades de ligação, esses equipamentos são capazes de realizar uma regulação de tensão com mínimas variações a partir do ponto em que foi instalado.

É preciso considerar, que existem reguladores com várias faixas de ajuste de tensão, essas faixas vão de  $\pm 5\%$  até  $\pm 10\%$ , entretanto, a faixa mais utilizada é de  $\pm 10\%$ , assim, utilizar-se-á deste para explicar o sistema de comutações. Considerando que os 32 *tap's* são

divididos por uma chave reversora de polaridade, tem-se, portanto, 16 elevadores e 16 rebaixadores.

As 16 possibilidades de comutação são realizadas através de 8 contatos fixos, e 2 móveis, que possibilitam a realização de regulações onde os contatos móveis estão sobre o mesmo contato fixo, como demonstrado na Figura 8(a) e ainda, quando os contatos móveis estão sobre contatos fixos diferentes, como apresentado na Figura 8(b). Na Figura 8(a), a corrente que circula entre os contatos móveis e o contato fixo, coloca os enrolamentos de regulação em paralelo, logo a tensão de saída no centro do enrolamento de equalização é muito próxima da tensão do contato fixo. Já, na Figura 8(b), é visualizada a comutação em ponto intermediário, nesse caso, a corrente  $I$ , se divide nos enrolamentos de regulação, fluindo através dos 2 contatos móveis e de 2 contatos fixos. Em consequência desse método de comutação, a tensão que aparece na saída de corrente ( $I$ ) é a metade do valor das tensões de regulações de cada *tap*, assim um enrolamento que possui 1,25% de regulação passa a possuir 0,625% de regulação, onde para um total de regulação de  $\pm 10\%$ , são necessárias 16 regulagens para elevação de tensão e 16 regulagens para redução de tensão (BURATTI, 2106).

Figura 8: Incremento de tensão de *tap* a cada passo



Fonte: Adaptado de (BURATTI, 2016, p. 61)

Ainda conforme a Figura 8, as comutações em pontos intermediários, são efetuadas pelo “reator de comutação, cuja finalidade é evitar a interrupção do circuito durante a comutação e limitar a corrente circulante entre duas derivações do enrolamento de regulação” (BURATTI, 2106, p. 58).

Esse tipo de comutação, além de dobrar a quantidade de comutações, evita a formação de arcos elétricos e conseqüentemente o desgaste das conexões, aumentando a vida útil dos mesmos.

### *2.3.2.3 Associação de reguladores*

Quando são associados 2 ou 3 reguladores de tensão, através de seus bornes, em redes de distribuição, esses formam o que chamam-se de Banco de Reguladores de Tensão. Mesmo associados, cada regulador monofásico comuta e ajusta sua tensão individualmente. Os tipos de ligação dependem da tensão nominal da rede e dos reguladores, normalmente são conectados em estrela aterrada, delta fechado e delta aberto.

Os bancos em estrela aterrada são recomendados em alimentadores onde a fonte possua o mesmo tipo de ligação, pois em caso de possíveis desequilíbrios na carga do banco, a corrente de neutro tem caminho fechado com a fonte através da terra (RESENER, 2008). Na Fotografia 2 é possível visualizar um Banco em estrela aterrada.

Fotografia 2: Banco de Reguladores de Tensão



Fonte: Próprio Autor

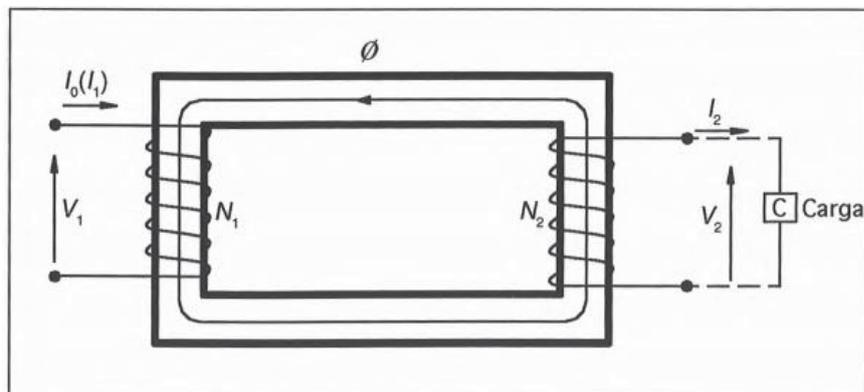
A ligação delta-fechado proporciona um aumento de 50% na faixa de regulação, ou seja, se o regulador monofásico é de  $\pm 10\%$ , o banco de reguladores passa a ser de  $\pm 15\%$ .

Os bancos em delta aberto utilizam-se de apenas 2 reguladores monofásicos, e são instalados em redes trifásicas com fonte em delta.

### 2.3.3 Transformadores de potência

Transformadores, em geral, são equipamentos que por meio de indução eletromagnética, transferem energia de um circuito primário para um circuito secundário, recebendo uma tensão nos bornes do primário e entregando outra tensão nos bornes do secundário, sem alterar a frequência (MAMEDE, 2005). A figura 9 ilustra um transformador monofásico.

Figura 9: Transformador monofásico elementar



Fonte: (MAMEDE, 2005, p. 450)

Onde:

$\phi$  = Fluxo Magnético (Wb);

$I_0(I_1)$  = Corrente Primária (A);

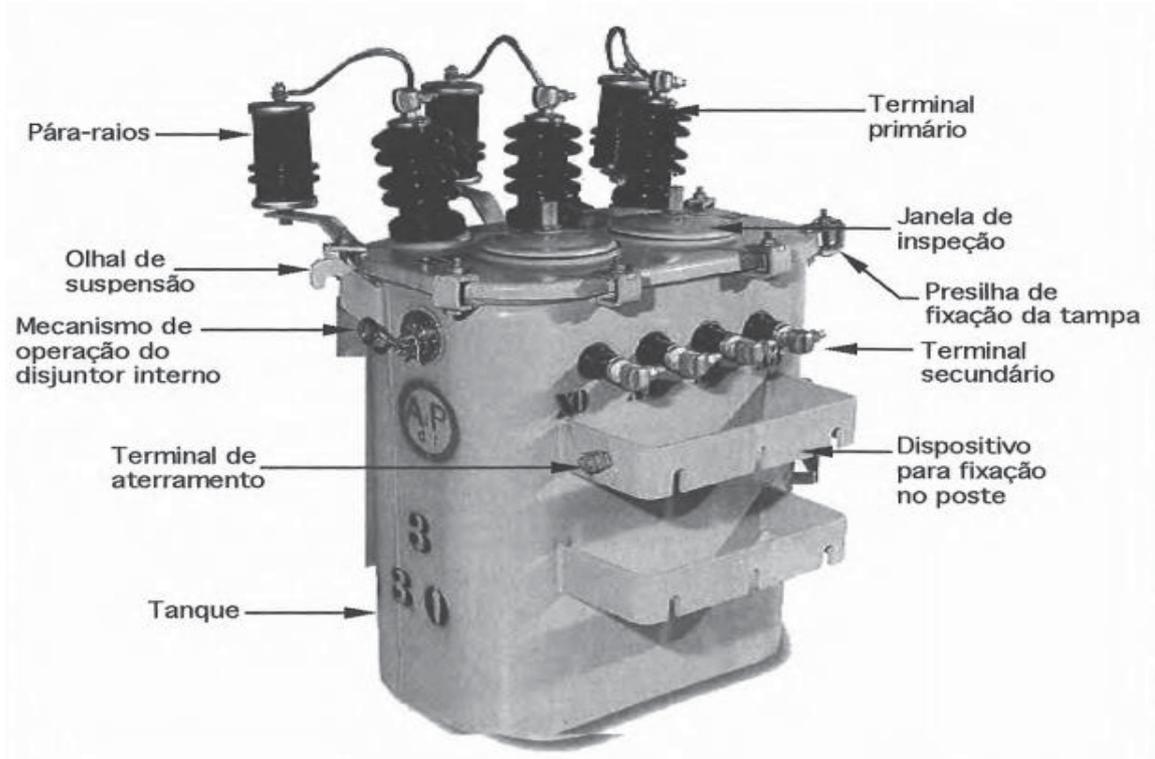
$V_1$  = Tensão Primária (V);

$I_2$  = Corrente Secundária (A);

$V_2$  = Tensão Secundária (V);

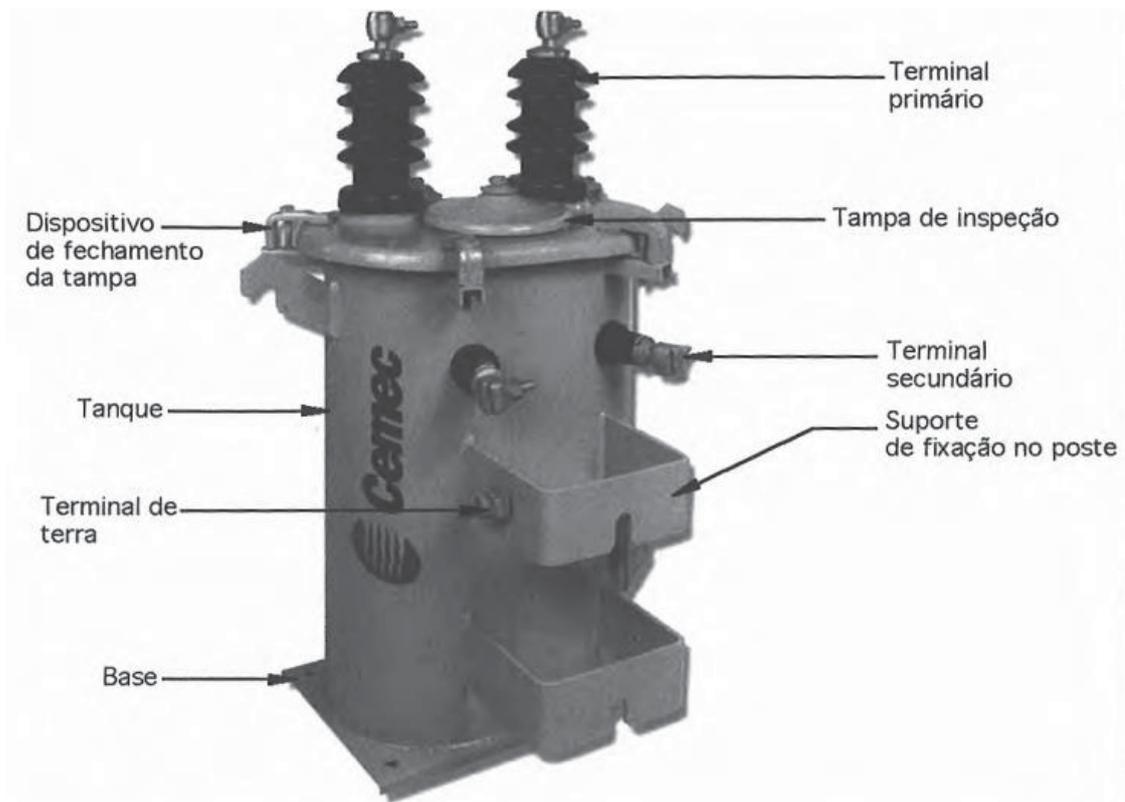
Nas redes de distribuição os transformadores operam normalmente com tensões de 13,8kV e 23,1kV no primário e 115/230V, 220/127V e 380/220V no secundário, e podem ser classificados como trifásicos, bifásicos e monobuchas, conforme a Figura 10, Figura 11 e Figura 12 respectivamente:

Figura 10: Transformador trifásico de distribuição



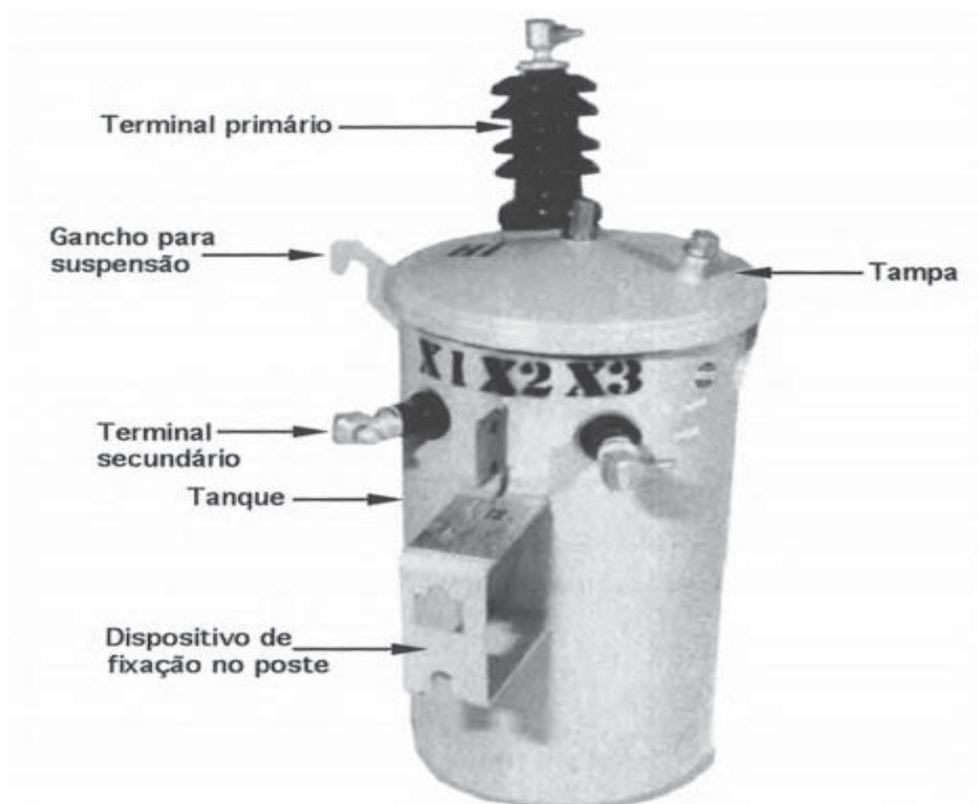
Fonte: (MAMEDE, 2005, p. 461)

Figura 11: Transformador bifásico



Fonte: (MAMEDE, 2005, p. 460)

Figura 12: Transformador monobucha (MRT)



Fonte: (MAMEDE, 2005, p. 459)

### 2.3.3.1 Comutação em Transformadores de distribuição

Os transformadores de distribuição são projetados com derivações em seus enrolamentos, onde estes são denominados de *tap's* e servem para adequação da relação de transformação, através da inserção ou da retirada de espiras do lado primário. Assim, quando a tensão recebida no terminal primário é abaixo do valor nominal, são retiradas espiras de seu enrolamento, em caso de tensão maior no primário, as espiras são aumentadas (AZEVEDO, 2011).

Existem 3 tipos de comutadores de *tap's*:

- Tipo painel, está imerso no óleo, para manipulação do mesmo é necessário abrir a tampa de inspeção, portanto o TR deverá estar sem tensão e sem carga;
- Linear e rotativo, pode ser interno, situado acima do óleo, ou externo, ambos são mais fáceis de manipular que o anterior, porém deverá estar sem tensão e sem carga;
- Comutador sob carga, se usa de um motor que é acionado por uma chave reversora;

Com a utilização dos comutadores e *tap's*, é possível realizar o ajuste da tensão de saída do transformador, em um valor mais próximo do adequado. Entretanto, existem ainda variações que podem ocorrer e fazer com que tais níveis se alterem, como a variação de carga e as quedas devido a redes muito extensas. Conforme visto anteriormente na figura 7, se o *tap* do TR for alterado para elevar os níveis de tensão do cliente situado a direita, certamente, em período de baixa carga, os clientes ligados diretamente ao TR e os ligados a esquerda do mesmo, sofrerão com sobre tensão. Nesse caso podem ser realizadas as substituições de cabos para melhoria do circuito.

### 2.3.4 Cabos

Os cabos são a parte mais importante das redes elétricas de distribuição, pois são eles que efetivamente transportam a energia da fonte até o ponto de consumo, atualmente os sistemas de distribuição são compostos por condutores de cobre e alumínio. Na grande maioria das vezes os condutores utilizados são de alumínio, pois apesar de os cabos de cobre serem melhores condutores, os mesmos apresentarem alto custo, e estão mais propensos a furtos.

As redes de distribuição são normalmente compostas por cabos de alumínio nas configurações:

- Cabo nu sem alma de aço (CA), são condutores encordoados, compostos apenas por alumínio, geralmente usados em vãos de redes curtos, de até 40m;
- Cabo nu com alma de aço (CAA), são condutores de alumínio encordoados sobre um fio de aço, conseqüentemente, possuem uma condutância menor, se comparados aos CA, porém apresentam alta resistência de ruptura, e podem ser utilizados em vãos muito longos, de até 1000m;
- Cabos multiplexados, são condutores de alumínio isolados e trançados, são utilizados geralmente em redes de baixa tensão;
- Cabos cobertos, são condutores de alumínio cobertos com uma camada de proteção mecânica, são utilizados em redes de média tensão, sustentados por um condutor mensageiro, através de espaçadores poliméricos;

A substituição de cabos é uma opção muito utilizada pelas concessionárias para melhorar os níveis de tensão, pois com a instalação de um condutor de maior bitola, com maior capacidade de corrente, é possível diminuir as perdas, e conseqüentemente elevar a

tensão. No entanto essa opção requer altos investimentos, pois além da substituição de condutores, poderão ser necessárias as substituições de estruturas, postes, sem contar os elevados valores de mão de obra e os impactos nos indicadores de continuidade.

Para atendimentos mais pontuais podem ser usados autotransformadores.

## 2.4 AUTOTRANSFORMADORES

O autotransformador é um equipamento que possui uma estrutura magnética igual a de um transformador, porém este não possui isolamento entre suas bobinas, ou seja, a bobina primária e a secundária estão eletricamente conectadas, por esse motivo, os autotransformadores possuem um grande rendimento e uma elevada potência nominal para um mesmo tamanho físico, se comparados aos transformadores.

Para que o autotransformador apresente mais vantagens em relação ao transformador, esses devem ser construídos com baixas relações de espiras entre o enrolamento primário e o enrolamento secundário. Em relações de espiras muito elevadas, com grandes diferenças de tensão entre o primário e o secundário, o autotransformador perde seu benefício, e ainda, pode acarretar sérios danos ao sistema elétrico, quando suas tensões primárias e secundárias estão em classe de tensões diferentes e ocorrer a abertura do enrolamento comum.

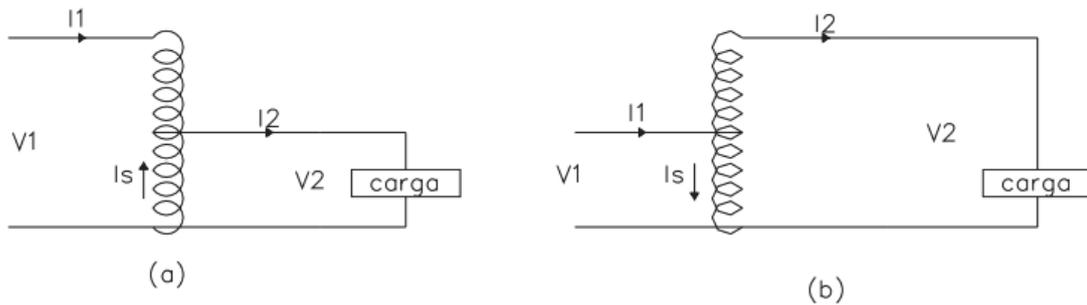
Como não possuem isolamento elétrica entre o enrolamento primário e o enrolamento secundário, existe uma parcela de potência circulante que utiliza condução direta e outra parte da potência utiliza o acoplamento magnético, reduzindo-se a quantidade de cobre necessária e o tamanho do núcleo de aço silício. A consequência disso é um tamanho final menor e um custo financeiro mais acessível para a mesma potência fornecida.

A potência dos autotransformadores se dá pela soma da Potência transformada e da Potência conduzida:

- Potência transformada: ocorre através da magnetização do núcleo de aço silício;
- Potência conduzida: é a potência que passa diretamente da fonte para carga através do condutor;

Os autotransformadores podem operar como rebaixadores, como apresentado na Figura 13(a) ou elevadores como apresentado na Figura 13(b):

Figura 13: Configurações de autotransformadores



Fonte: (PENZ, 2014)

Idealmente, a potência primária é igual a potência secundária, portanto, para o autotransformador abaixador da Figura 13(a), no primário, a tensão será maior que a do secundário, logo, a corrente menor que a corrente do secundário. Já, no secundário, a tensão será menor que a do primário, logo a corrente será maior que a corrente do primário. Pode-se dizer então que a corrente  $I_s$  deve contribuir para a formação da corrente secundária  $I_2$  e ela equivale a parcela da corrente transformada (PENZ, 2014).

Primeiramente, na Figura 13 (a), é possível encontrar a corrente secundária ( $I_2$ ) através da Equação 7:

$$I_2 = I_1 + I_s \quad (7)$$

Onde:

$I_1$  = Corrente primária (A);

$I_s$  = Corrente transformada (A);

Em seguida pode-se definir a potência transformada ( $P_t$ ) através da Equação 8:

$$P_t = V_2 \times I_s \quad (8)$$

Onde:

$V_2$  = Tensão no secundário (V);

Agora com base na Figura 13 (b), é possível encontrar a corrente secundária  $I_2$  através da Equação 9:

$$I_2 = I_1 - I_s \quad (9)$$

Para definição da potência transformada ( $P_t$ ), será usada a Equação 10:

$$P_t = V_1 \times I_s \quad (10)$$

Onde:

$V_1$  = Tensão no primário (V);

As potências conduzidas ( $P_c$ ), são calculadas para ambas as configurações, através da Equação 11.

$$P_c = P_{total} - P_t \quad (11)$$

Onde:

$P_{total}$  = Potência total (W);

Com o objetivo de reduzir as perdas em equipamentos de transformação, a seguir será apresentado um estudo sobre os núcleos magnéticos.

## 2.5 NÚCLEOS MAGNÉTICOS

Os campos magnéticos, dentre outras utilidades tem a função servir como, “intermediário”, para a conversão de energia em transformadores, em motores, geradores, reatores, entre outros, realizando transformações elétricas ou eletromecânicas, como pode ser visualizado na Figura 14 (PENZ, 2014).

Figura 14: Utilização do campo magnético



Fonte: (PENZ, 2014)

Antes de tratar dos núcleos magnéticos, serão apresentados alguns conceitos sobre campos magnéticos.

A permeabilidade magnética é a capacidade que um determinado material tem de receber linhas de indução em seu interior, comparando-se a um circuito elétrico, é a condutância oferecida a circulação de corrente através de um material. A permeabilidade é representada pela letra  $\mu$ .

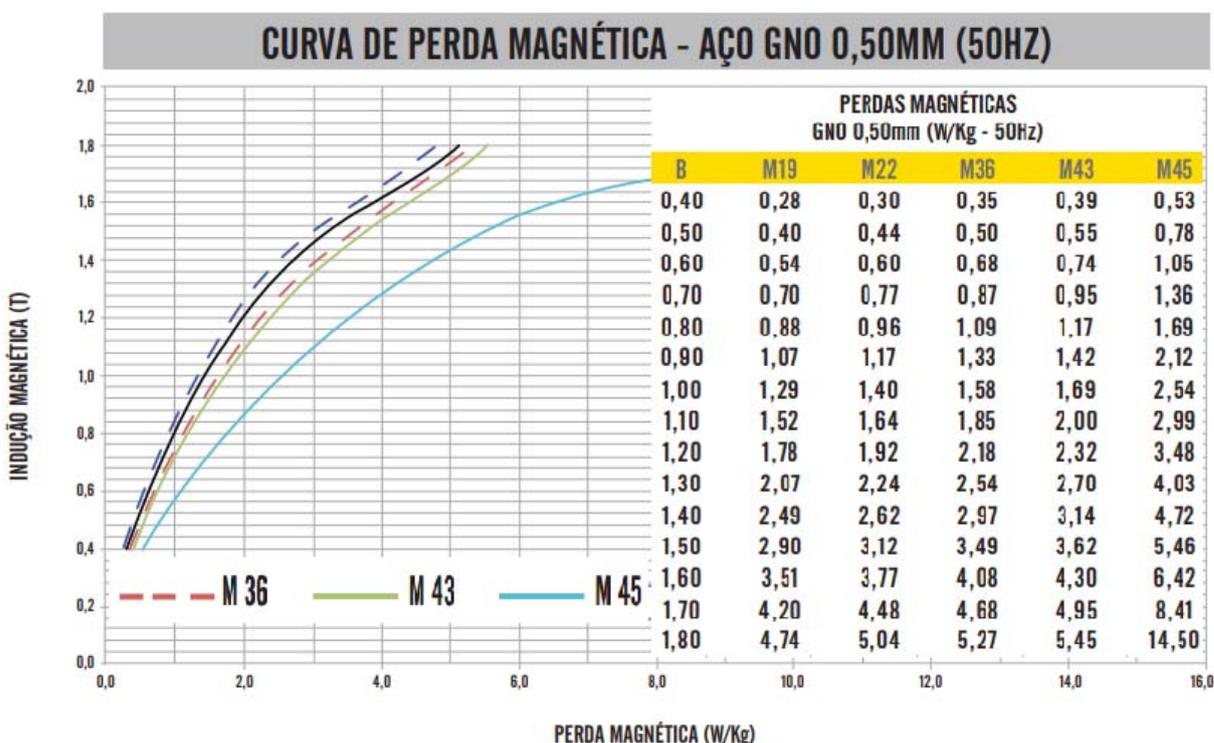
A densidade de fluxo magnético é a quantidade de linhas de fluxo por unidade de área, e é expressa em Tesla (T).

Intensidade de campo magnético é a quantificação da distribuição da Força Magnetomotriz (Ae), ao longo do caminho do circuito, e é expressa em Ampére espira por metro (Ae/m).

Atualmente, em núcleos magnéticos, são utilizadas chapas de aço silício de dois tipos, a de Grão Orientado (GO) e as de Grão Não Orientado (GNO). As chapas de GO têm, como principal objetivo, reduzir as perdas magnéticas, para isso, as mesmas passam por um tratamento que faz com que o material fique com uma orientação magnética em um determinado sentido. A permeabilidade magnética nesse sentido pode ser cerca de duas vezes maior que a permeabilidade de uma chapa GNO. As chapas GNO possuem como vantagem apenas o baixo custo.

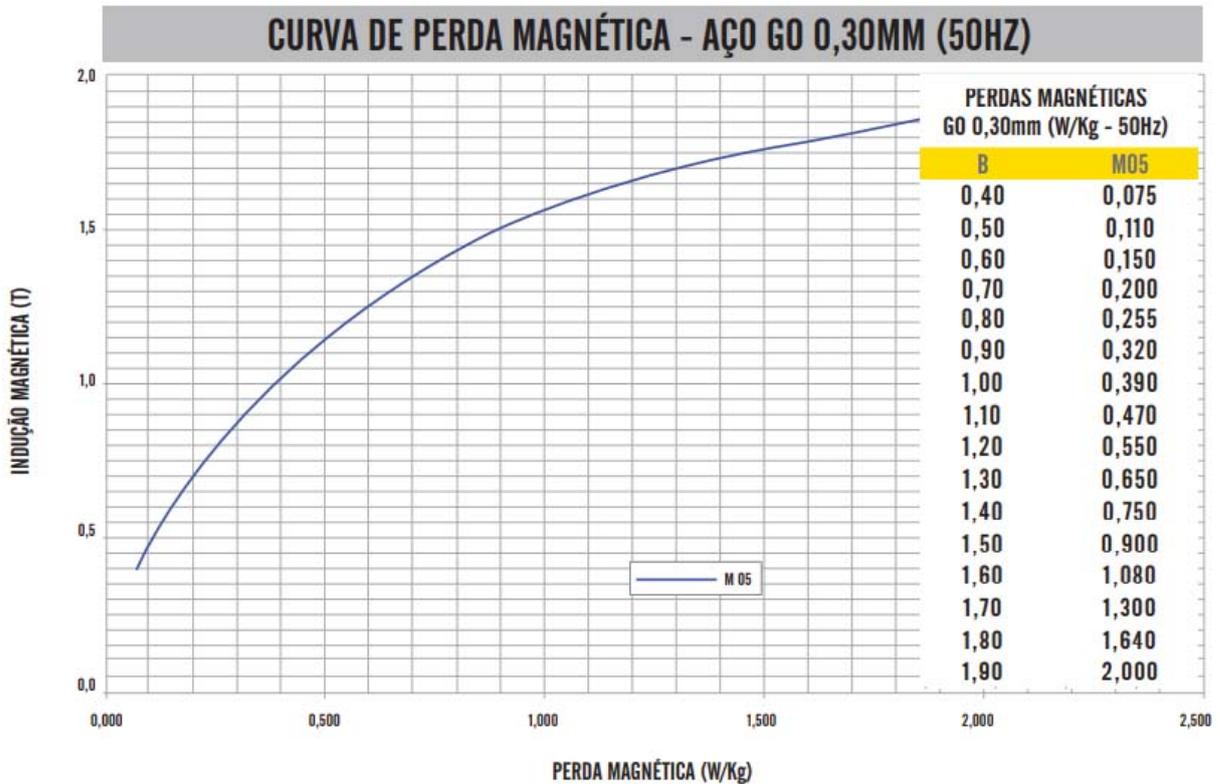
De acordo com a Figura 15, uma chapa de aço silício de GNO de 0,5mm de espessura, do tipo M45, quando submetida a uma frequência de 50 Hz, e a uma densidade de fluxo magnético de 1,5 T, gera uma perda de 5,46 W/Kg, enquanto, conforme a Figura 16, uma chapa de aço silício de GO de 0,3mm de espessura, do tipo M05, quando submetida a uma frequência de 50 Hz, e a uma densidade de fluxo magnético de 1,5 T, gera uma perda de apenas 0,9 W/Kg (SOMA BRASIL LTDA, 2017).

Figura 15: Curva de perdas magnéticas em GNO



Fonte: Adaptado de (<http://www.somabrasil.com.br/qualidade>)

Figura 16: Curva de perdas magnéticas em GO



Fonte: Adaptado de (<http://www.somabrasil.com.br/qualidade>)

Os núcleos magnéticos de pequenos transformadores são fabricados habitualmente no formato EI ou no formato toroidal. Os núcleos toroidais apresentam várias vantagens com relação aos núcleos EI:

- Menores dispersões magnéticas em torno do núcleo, não influenciando nos circuitos eletrônicos próximos ao mesmo;
- Menores perdas no núcleo, devido a possibilidade de utilizar GO, logo, terá um menor consumo;
- São menores e mais leve;
- São mais silenciosos;
- Não possuem *GAP*, reduzindo as perdas;
- Baixas temperaturas de operação;
- Facilidade de montagem do núcleo;

Ainda, com relação à forma construtiva do núcleo, as denominações também são conhecidas como núcleos empilhados e núcleos enrolados. As perdas no ferro dos transformadores de núcleo enrolado são aproximadamente 17,80% menores, e as perdas no cobre são aproximadamente 6,80% menores (MATTOS et al., 2010)

### 3 DESENVOLVIMENTO

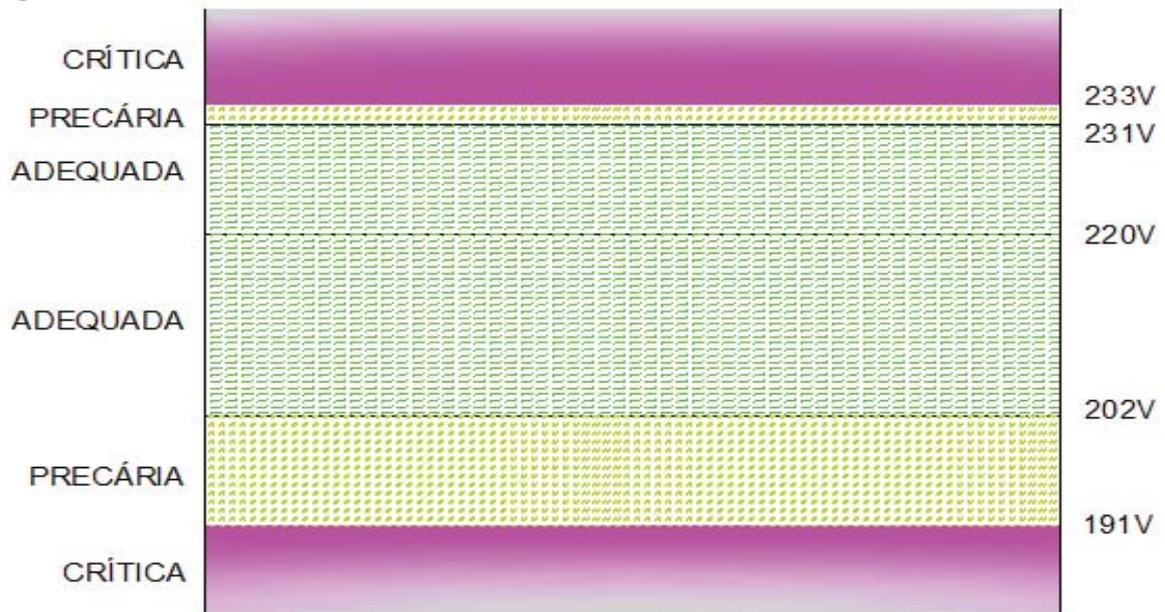
Conforme objetivado no Capítulo 1, o trabalho em questão visa projetar, dimensionar e desenvolver de maneira experimental e laboratorial, um sistema de regulação de tensão automático eficiente, e de baixo custo, onde este, deverá ser ligado a montante de uma determinada carga monofásica, seja um equipamento, ou mesmo um consumidor atendido por uma ligação de BT.

Sendo um dos objetivos, a instalação do equipamento em série com a carga, junto ao ponto de conexão do consumidor com a concessionária, e permanecendo o mesmo ligado de forma permanente, o sistema deverá apresentar baixo consumo de energia elétrica, inclusive a vazio, ou seja, deverá possuir baixas perdas. Para tal, está projetado um transformador com núcleo toroidal enrolado, que diminui a dispersão magnética, e também, com chapas de aço silício de Grão Orientado (GO), que possuem grande capacidade de aumento na indução magnética, podendo chegar a até 1,7T, necessitando assim, uma baixa corrente de magnetização.

Para o atendimento de um consumidor, o equipamento acaba se tornando de grande potência, e com maiores perdas, o que, por sua vez, pode aumentar as perdas nas redes de distribuição das concessionárias. A utilização em cargas específicas, além de apresentar um menor tamanho, e menores perdas, pode ser realizada apenas nos locais onde há necessidade, corrigindo pontualmente o problema.

Como, na grande maioria das vezes, os problemas nas redes de distribuição são de queda de tensão, o sistema foi projetado para corrigir apenas essa situação. Tendo em vista que um dos objetivos é projetar um equipamento com elevada robustez, o mesmo, não possuirá microprocessadores, pois estes são mais susceptíveis a influências externas, tais com ruídos, quedas de tensão, dentre outros. Assim, um circuito simples para atuação com referência a tensão da rede, está desenvolvido, e possui apenas um *tap* de regulação, onde esse, é capaz de incrementar 21V na saída do autotransformador, ajustando a tensão de nível crítico para os parâmetros adequados, como pode ser visualizado na Figura 17.

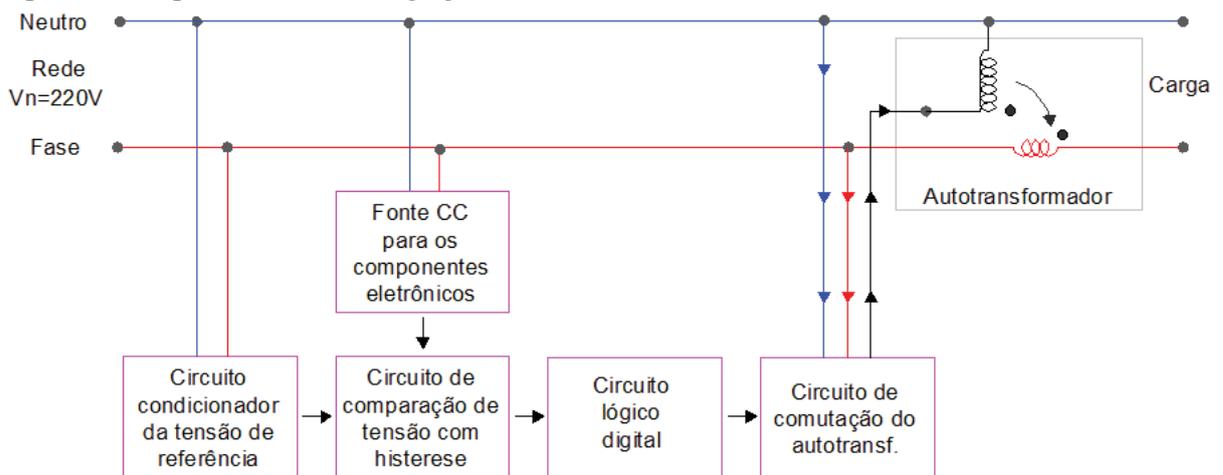
Figura 17: Faixas de tensão do PRODIST



Fonte: Próprio Autor

Ao identificar uma redução na tensão da entrada, abaixo de 203V, o sistema efetua a comutação automaticamente, modificando a relação de transformação do autotransformador ( $\alpha$ ) e, portanto, corrigindo a tensão fornecida a carga. Tão logo a tensão de entrada se eleve novamente, acima de 207V, a relação  $\alpha$  volta a ser a inicial. A Figura 18 apresenta os principais blocos desenvolvidos.

Figura 18: Diagrama de blocos do projeto



Fonte: Próprio autor

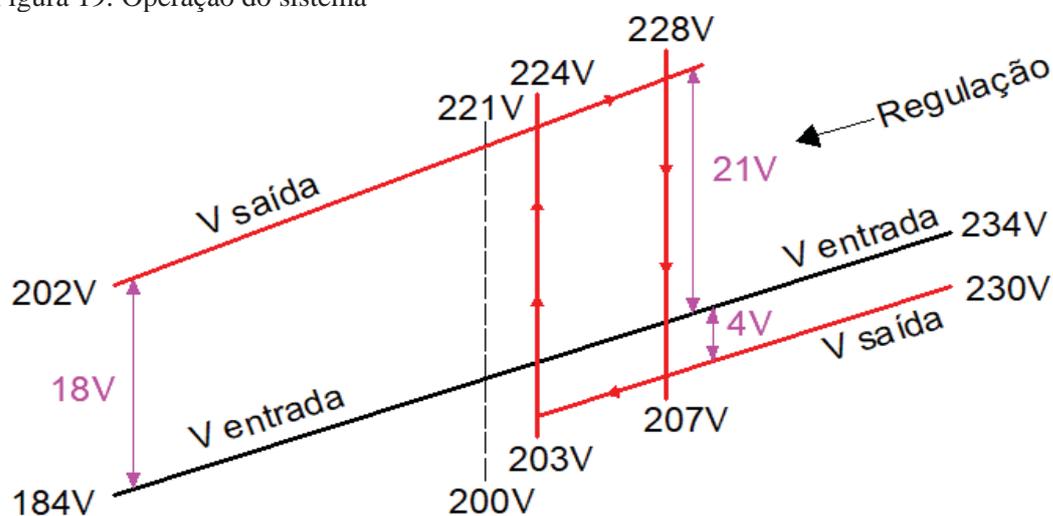
Foi projetado um transformador exclusivo para o Circuito Condicionador da Tensão de Referência, visto que, as variações de consumo dos componentes, podem distorcer o valor de tensão que é enviado para o Circuito de comparação.

O circuito de adequação de tensão, fornece em sua saída, uma tensão reduzida proporcional a entrada da rede elétrica, essa, é enviada ao circuito de comparação de tensão com histerese, que por sua vez, faz a comparação com um valor de tensão predefinido, e envia um sinal ao circuito lógico digital.

De posse do sinal enviado pelo comparador, o circuito lógico atua de maneira que as duas saídas, com elevação de tensão e sem elevação de tensão, não sejam acionadas ao mesmo tempo. Para o funcionamento deste, foi desenvolvido um circuito gerador de onda quadrada sincronizado com a rede elétrica.

Ao circuito de comutação do autotransformador, cabe a tarefa de manter o contato fechado ou aberto, ou seja, efetivamente modificar a relação de transformação  $\alpha$  do equipamento. Inicialmente, a opção foi por utilizar chaves de estado sólido, para o chaveamento do autotransformador, porém essas são de elevado custo, o que vai em sentido oposto a ideia proposta. Como segunda opção, foi definido o uso de TRIACs para essa função, e por fim, ainda foi considerada a possibilidade de usar relés se fosse o caso. Na Figura 19 podemos observar o modo de operação do sistema.

Figura 19: Operação do sistema



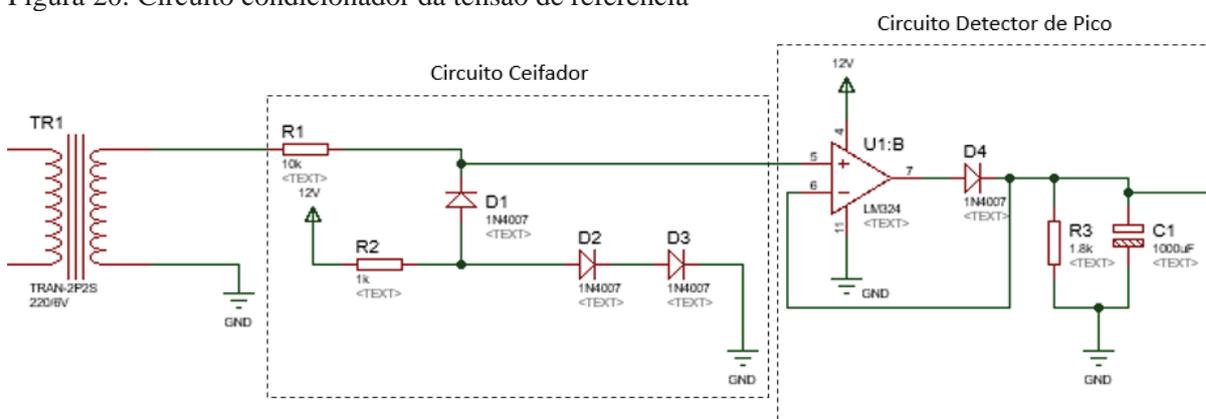
Fonte: Próprio autor

### 3.1 CIRCUITO CONDICIONADOR DA TENSÃO DE REFERÊNCIA

Para realizar a comparação da tensão da rede elétrica de distribuição com a tensão mínima aceitável, isto é, no limite do nível adequado, foi projetado um circuito a fim de entregar uma tensão reduzida a entrada inversora do Amplificador Operacional LM324 do circuito de comparação. Para alimentar exclusivamente esse circuito, foi instalado um

transformador abaixador de tensão, que irá fornecer em seu secundário uma tensão proporcionalmente reduzida. A partir do secundário, foi projetado um circuito retificador, visto que é necessário fornecer um sinal contínuo ao comparador, em seguida, essa tensão foi passada pelo circuito ceifador, que é composto pelos diodos D1, D2 e D3 juntamente com o resistor R2 e uma fonte CC de 12V. O sinal do circuito ceifador alimenta o detector de pico, que juntamente com o capacitor C1 e o resistor R3, retifica e filtra a tensão de saída. O circuito pode ser visto na Figura 20.

Figura 20: Circuito condicionador da tensão de referência



Fonte: Próprio autor

### 3.1.1 Transformador do circuito condicionador da tensão de referência

Foi especificado o transformador, TR1 com as seguintes características:

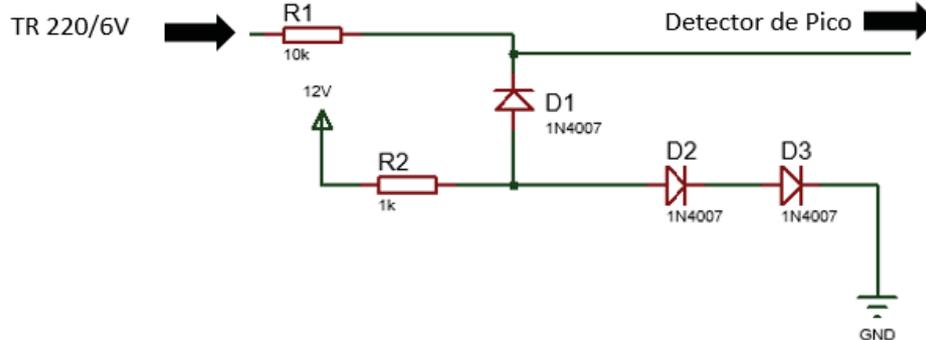
- Tensão de entrada: 220V;
- Tensão de saída: 6V;
- Corrente do secundário: 0,5A;
- Frequência: 60Hz.

### 3.1.2 Circuito Ceifador

Como a variação de tensão incidirá sobre os bornes primários do transformador de 220/6V, esse, através da sua relação de transformação  $\alpha$ , irá refletir em seu secundário uma variação proporcionalmente reduzida. Diretamente no secundário do equipamento, foi projetado um resistor R1, de 10k $\Omega$ , com o intuito de limitar a corrente do circuito. Para que não exista uma tensão negativa na entrada não inversora do mesmo, foi proposto um circuito ceifador composto pelos diodos D1, D2 e D3 do modelo 1N4007, pelo resistor R2 de 1k $\Omega$  e

também pela fonte CC de 12V. Os diodos D2 e D3, são responsáveis por garantir uma tensão de 1,4V no anodo do diodo D1. Quando a tensão no catodo do D1 for inferior a 1,4V, este passará a conduzir, e, portanto, a tensão mínima recebida pelo circuito ceifador será de 0,7V, compensando a queda de tensão do diodo D4 do circuito detector de pico. A Figura 21 apresenta o circuito ceifador.

Figura 21: Circuito Ceifador



Fonte: Próprio autor

### 3.1.3 Circuito Detector de pico

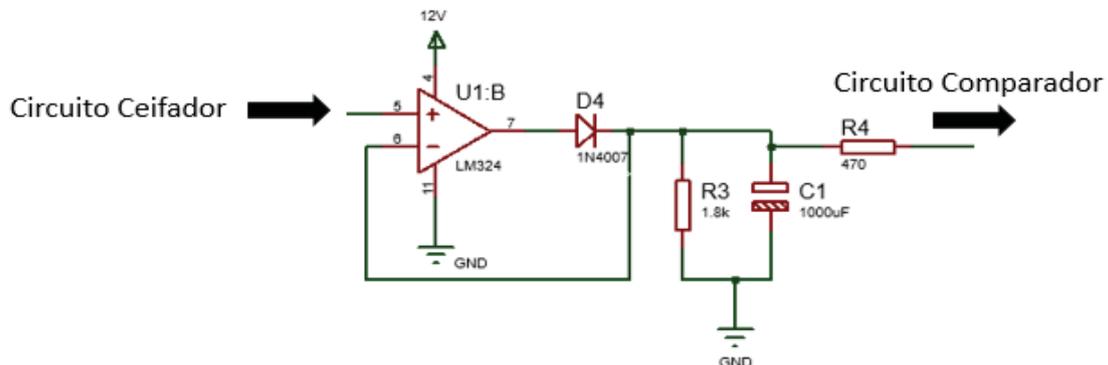
O circuito detector de pico, tem como objetivo, receber a tensão do circuito ceifador e carregar o capacitor C1, transformando a tensão de meia onda em uma corrente contínua.

Para o dimensionamento do resistor R3, em uma frequência de 60Hz, foi utilizada a Equação 12, e estipulado o capacitor C1 em 1000uF.

$$R \cdot C > 100 \cdot T_{\text{máx}} \quad R > \frac{100 \cdot 0,0166}{0,001} \quad R > 1,66k\Omega \quad (12)$$

Portanto, foi definido um resistor de 1,8kΩ. A Figura 22 apresenta o circuito detector de pico.

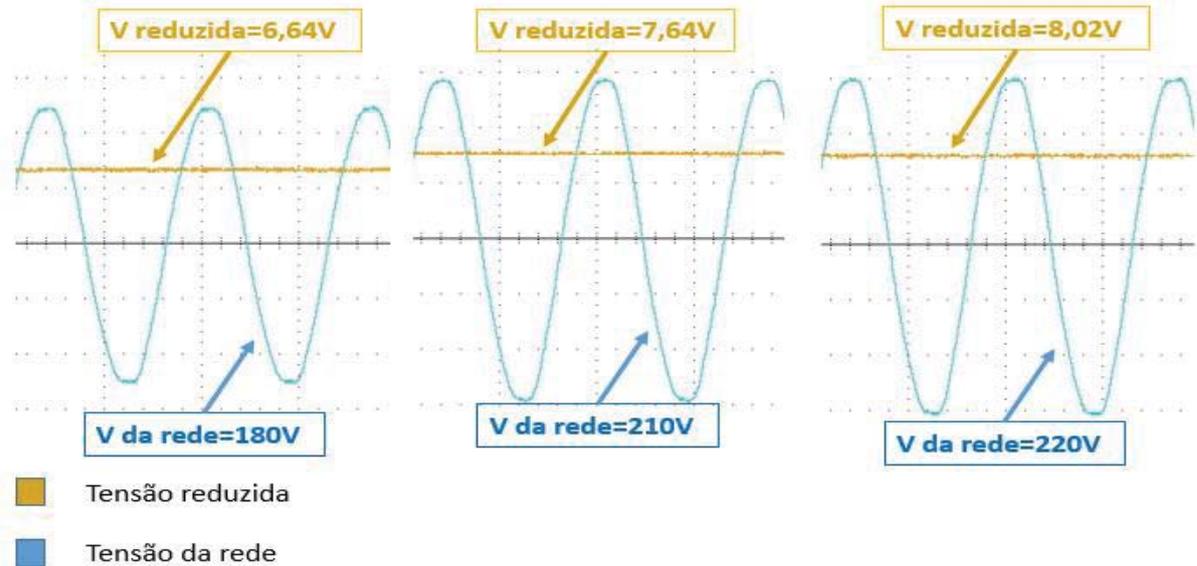
Figura 22: Circuito Detector de Pico



Fonte: Próprio autor

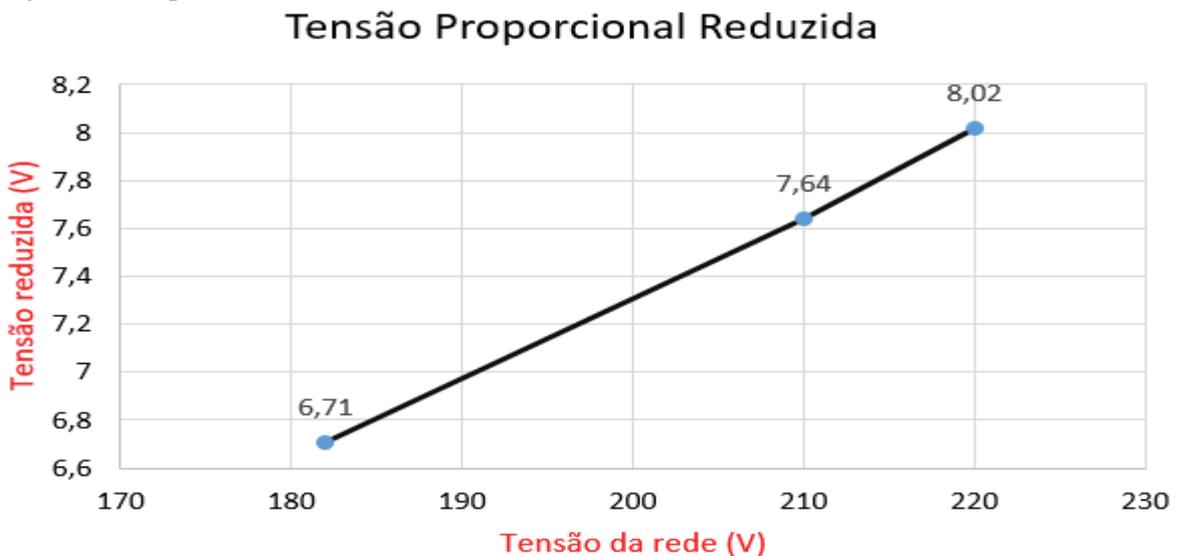
Examinando a Figura 23 e a Figura 24, é possível concluir que a variação de tensão é proporcional, porém, apresenta um erro de aproximadamente 0,4%, mesmo assim, atende a necessidade do protótipo.

Figura 23: Comparativo da tensão de rede x tensão reduzida em 3 níveis de diferentes



Fonte: Próprio autor

Figura 24: Proporcionalidade da tensão reduzida



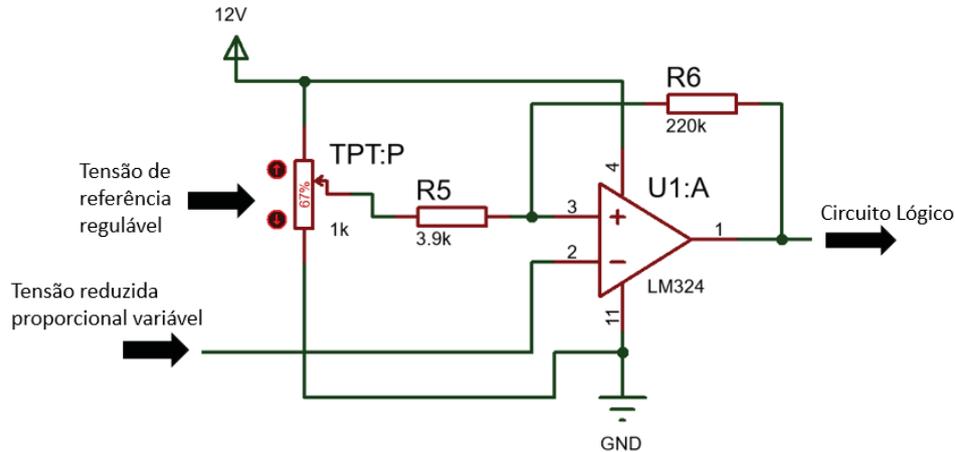
Fonte: Próprio autor

### 3.2 CIRCUITO DE COMPARAÇÃO

Essa etapa, tem a função de fazer a comparação da tensão de entrada reduzida, com uma tensão regulada estável e ajustada de referência, através do trimpot de  $1K\Omega$ , denominado

apenas como TPT. A tensão reduzida, é recebida em uma porta inversora, enquanto, a porta não inversora do Amplificador Operacional LM324, recebe a tensão regulável pelo TPT e faz a comparação das mesmas, ou seja, se a tensão na entrada não inversora é maior que a inversora, na saída, há +VCC, se a tensão na entrada não inversora é menor que a inversora, na saída haverá GND. A Figura 25 ilustra o circuito.

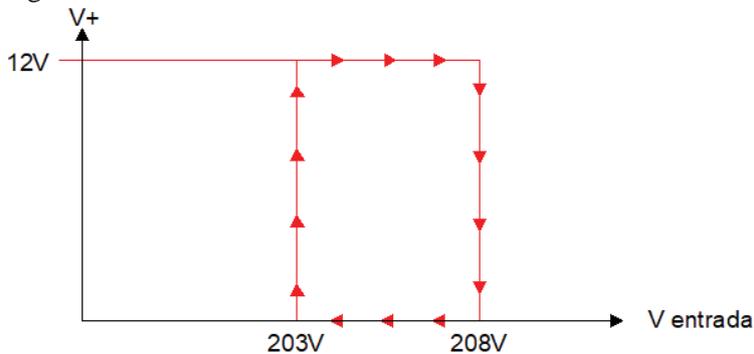
Figura 25: Circuito Comparador de tensão com histerese



Fonte: Próprio autor

Dentro do contexto do projeto, o sistema não pode ter apenas um ponto de comutação no comparador, uma vez que, quando, a tensão permanecer com pequenas variações, em torno de 203V, o mesmo irá fazer comutações sucessivas, o que não traria benefícios nem ao equipamento, nem a carga. Para solucionar esse problema, o comparador foi complementado com sistema de histerese, conforme a Figura 26.

Figura 26: Gráfico de Histerese



Fonte: Próprio autor

Como o circuito redutor de tensão fornece uma tensão de 8,2V quando alimentado por 220V, e, com sua tensão proporcionalmente reduzida, o mesmo fornecerá uma tensão de

7,61V, ao ser alimentado com 203V. Projetando-se uma histerese de 5V, o sistema deverá comutar novamente quando a alimentação atingir uma tensão de 208V.

Para obter-se o valor de R5 e R6, também é sabido, que a tensão  $V_+$  é de 12V, e a tensão  $V_-$  é de 0V. O resistor R5 foi definido como sendo de  $3,9K\Omega$  e a tensão  $V_F$  como 7,7V. Para realizar o cálculo do resistor R6, foi utilizada a Equação 13.

$$V_{hi} = (V_0 - V_F) \cdot \frac{R_5}{R_5 + R_6} + V_F \quad (13)$$

$$7,61 = (12 - 7,7) \cdot \frac{3,9K}{3,9K + R_6} + 7,7 \quad R_6 = 182K\Omega$$

Onde:

$V_{hi}$  = Tensão de histerese inferior;

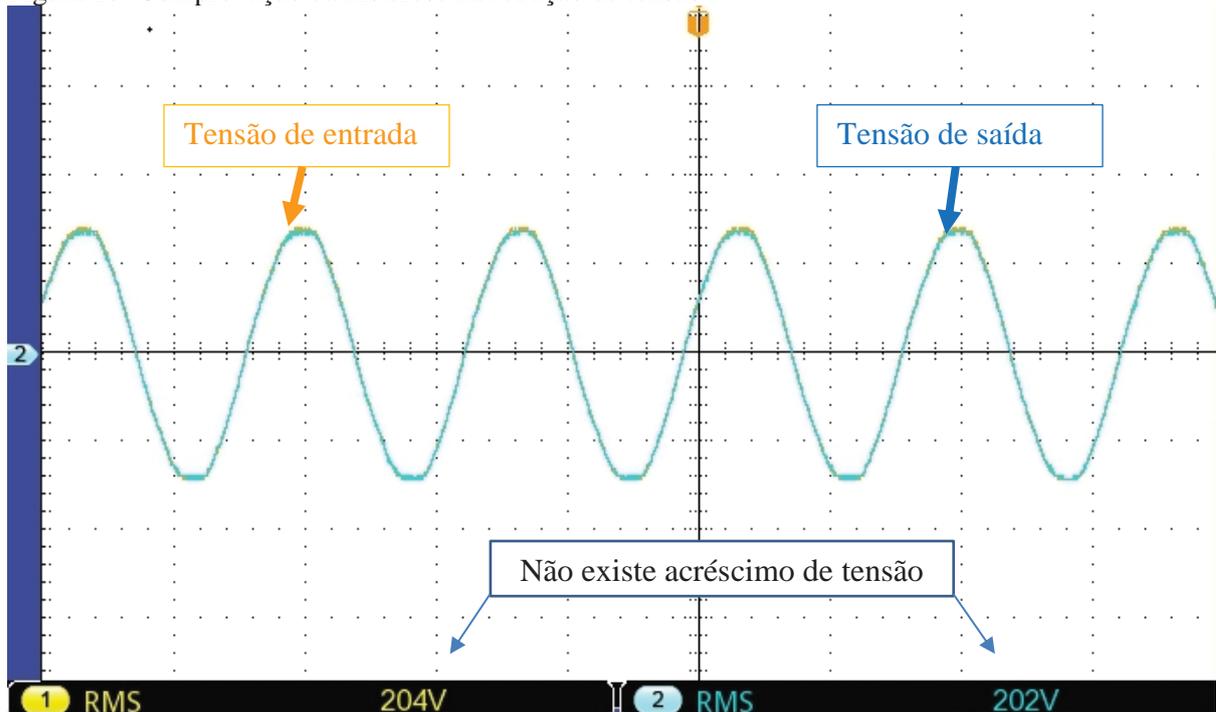
$V_0$  = Tensão de saída saturada positiva;

$V_F$  = Tensão da Fonte;

Portanto, foi definido um resistor R2 de  $220k\Omega$ .

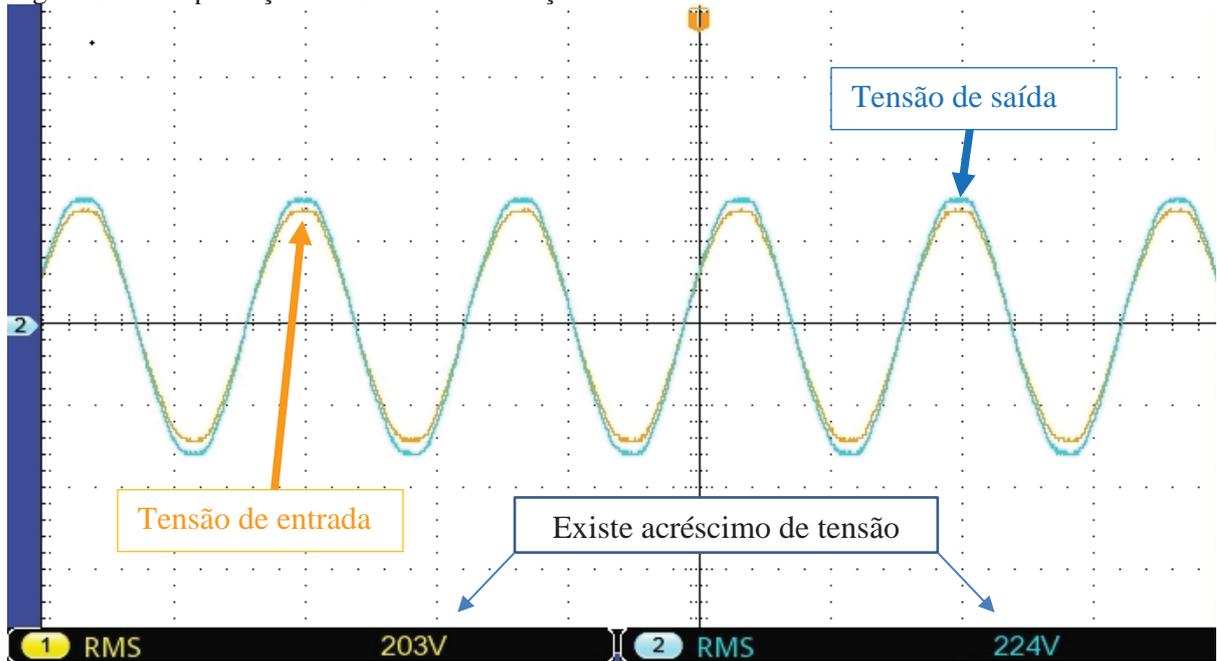
Na Figura 27, quando os níveis de tensão da rede estão caindo, é possível observar que, a tensão de entrada está com uma magnitude de 204V, e, ainda não existe um incremento de tensão sobre a carga, então, a comutação ainda não aconteceu. Já, na Figura 28, com 203V na entrada, pode-se verificar que em sua saída, há uma tensão de 224V.

Figura 27: Comprovação da histerese na redução de tensão



Fonte: Próprio autor

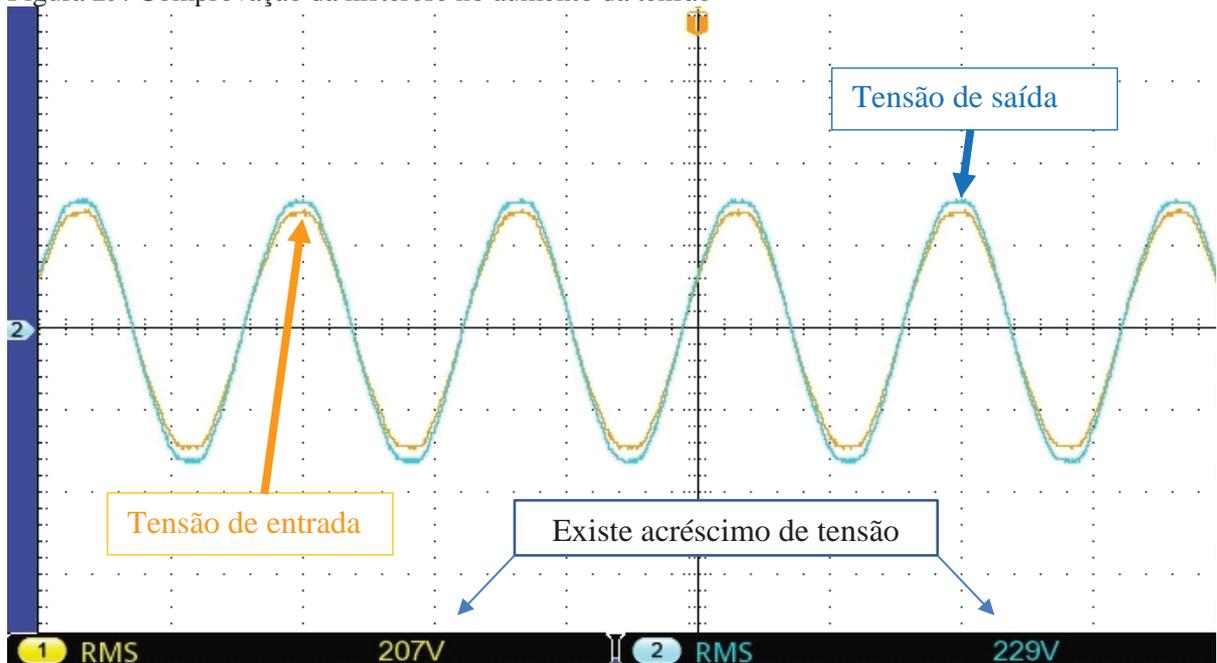
Figura 28: Comprovação da histerese na redução de tensão



Fonte: Próprio autor

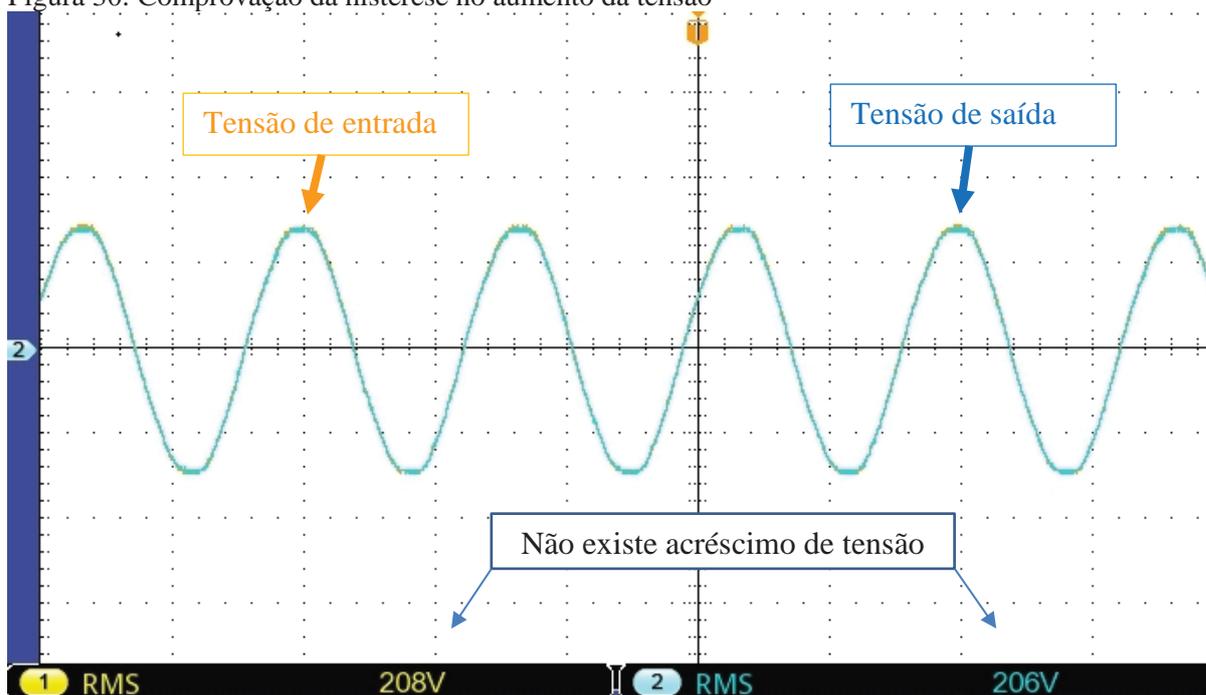
Agora, na Figura 29, os níveis de tensão da rede voltam a se elevar, e a mesma já atinge 207V, no entanto, devido a histerese implementada, ainda está sendo induzida a tensão no enrolamento, e a saída apresenta uma tensão de 229V. Na Figura 30, onde a tensão de entrada atinge 208V, a saída já não possui acréscimo de tensão.

Figura 29: Comprovação da histerese no aumento da tensão



Fonte: Próprio autor

Figura 30: Comprovação da histerese no aumento da tensão



Fonte: Próprio autor

### 3.3 CIRCUITO LÓGICO

Primeiramente, para fazer o uso de TRIAC, no processo de comutação dos “*taps*” do autotransformador, atenta-se, que este dispositivo realiza a comutação no momento em que a senóide passa por zero. Admitindo-se que grande parte das cargas são indutivas, e portanto, a corrente é atrasada em relação a tensão, nesse caso, haverá um atraso no desligamento de um TRIAC, enquanto o outro irá ligar imediatamente, podendo causar um curto circuito no primário do autotransformador.

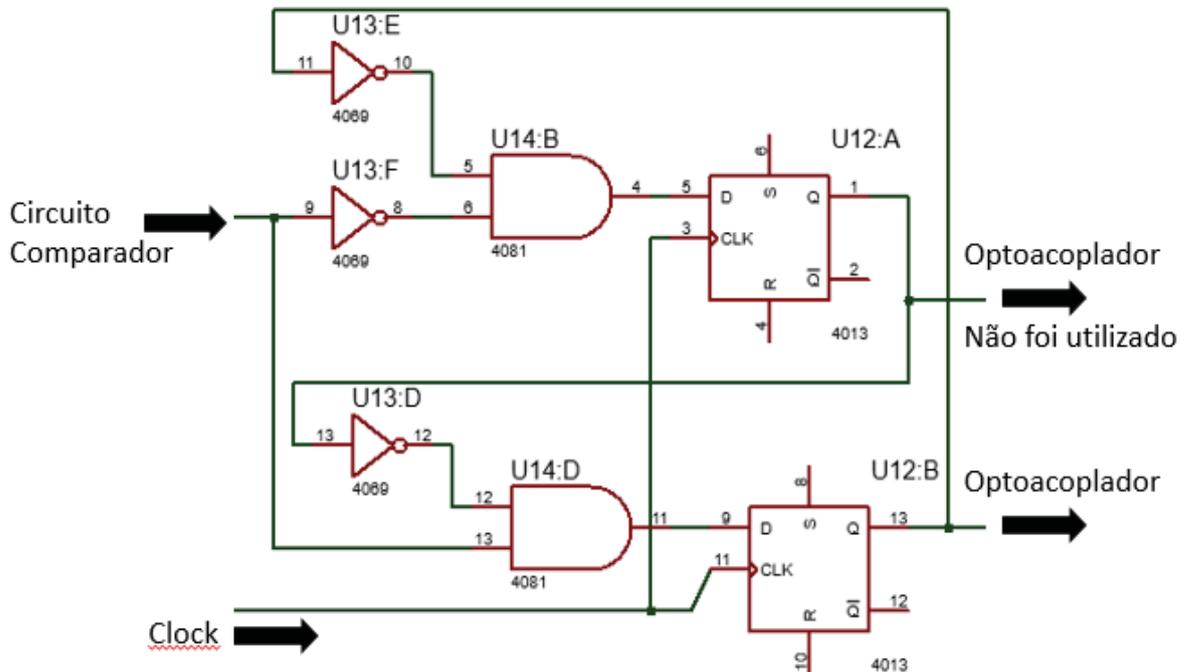
De posse dessa informação, avaliou-se necessário, a criação de um atraso durante as transições de comutação, para isso, foi desenvolvido, um circuito lógico composto por 3 portas lógicas NOT do CI CD4069, 2 AND do CI CD4081, além de 2 FLIP FLOP do tipo D do CI CD4013.

Como a principal meta dessa etapa é fazer com que, as duas saídas nunca estejam ligadas ao mesmo tempo, utilizamos a porta NOT U13:F a jusante da porta AND U14:B. Essa configuração, impede que as portas AND forneçam o mesmo sinal em suas saídas.

Os FLIP FLOP tipo D, são responsáveis por transmitir os dados D, da sua entrada, para suas saídas Q e  $\bar{Q}$ . O dispositivo atualiza as saídas, nas bordas de subida do *clock* recebido. De posse dos sinais diferentes enviados pelas portas AND, os FLIP FLOP repassam estes para as saídas.

Para que exista um período de diferença entre o desligamento de um, e o acionamento do outro TRIAC, as saídas Q de U12:A e U12:B, são conectadas as entradas U14:D e U14:B respectivamente, passando antes pelas portas NOT U13:D e U13:E. Na Figura 31 é possível visualizar o esquema lógico.

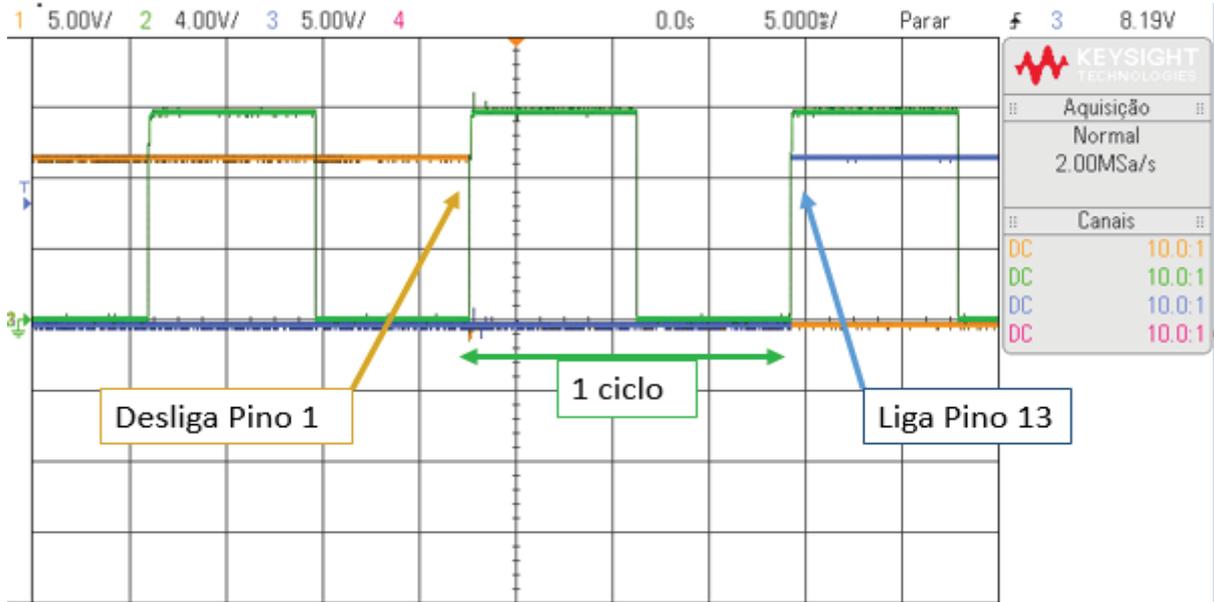
Figura 31: Circuito lógico



Fonte: Próprio autor

A realimentação prevista a partir do pino 1 e do pino 13 do FLIP FLOP, garante um período de diferença entre as comutações, visto que, um dos dados de entrada, só será atualizado na borda de subida seguinte do *clock*. Na Figura 32 é possível ver o período em que o pino 1 muda para ativo baixo e o pino 13 muda para ativo alto garantindo um ciclo de senóide completo de intervalo de comutação.

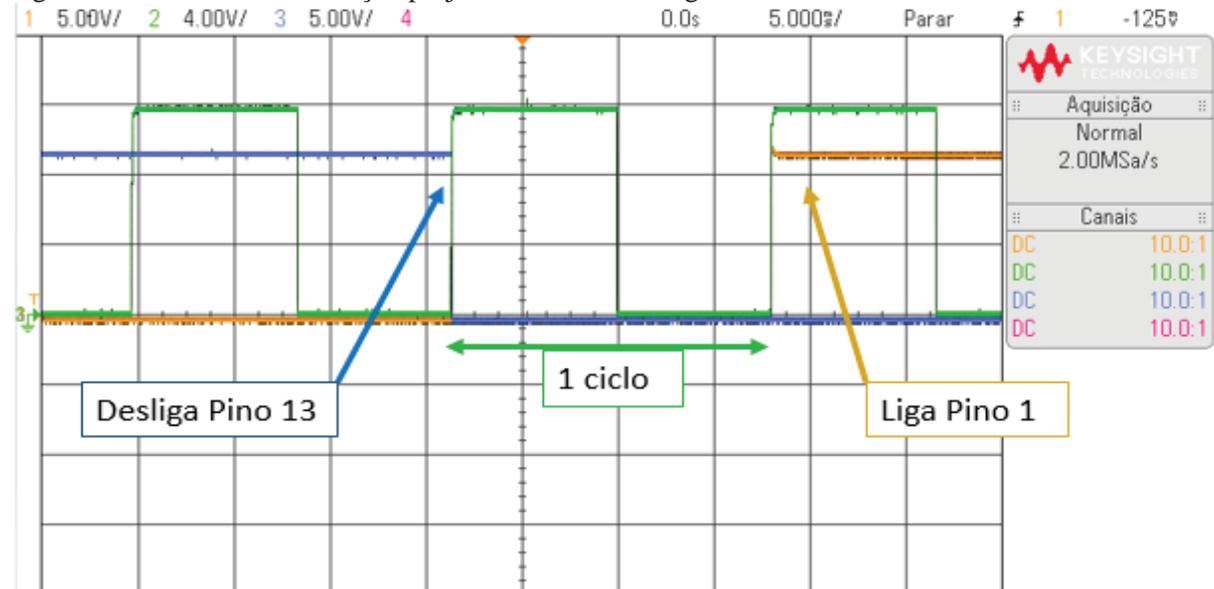
Figura 32: Retardo da comutação projetado no circuito lógico



Fonte: Próprio autor

Na Figura 33 é possível ver o período em que o pino 13 muda para ativo baixo e o pino 1 muda para ativo alto.

Figura 33: Retardo da comutação projetado no circuito lógico



Fonte: Próprio autor

Como pôde ser observado na Figura 32 e na Figura 33, a realimentação, a partir das saídas do FLIP FLOP, garante um período de diferença entre as comutações, visto que um dos dados de entrada só é atualizado, na borda de subida seguinte do *clock*. Na Figura 34, é

possível constatar, que mesmo com uma carga indutiva, em nenhum momento as saídas estão ligadas simultaneamente.

Figura 34: Retardo na comutação do sistema com carga indutiva

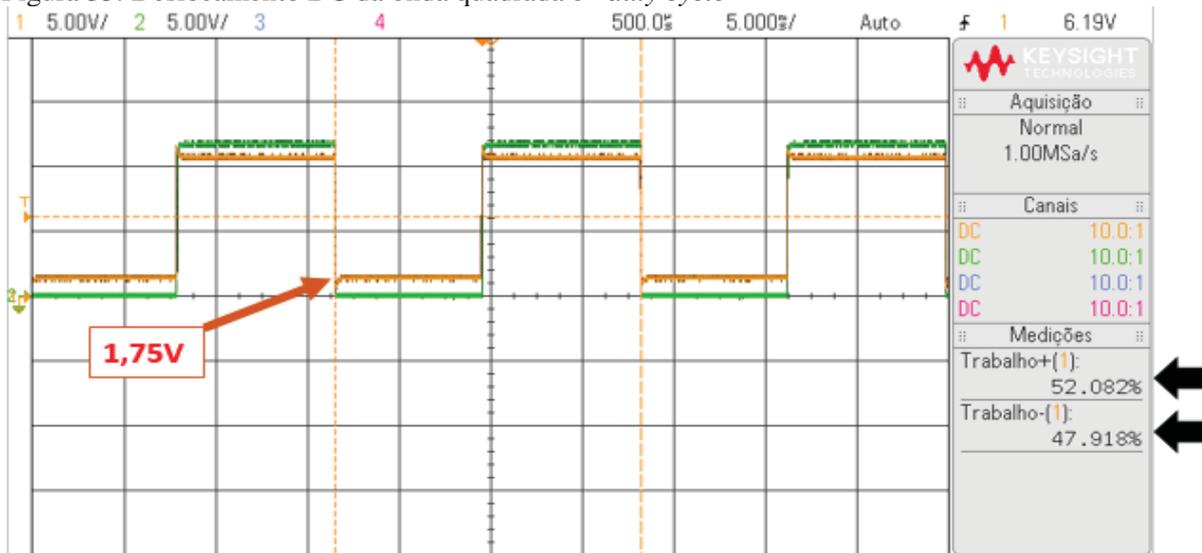


Fonte: Próprio autor

### 3.4 CIRCUITO GERADOR DE ONDA QUADRADA

Diante do exposto no capítulo 3.3, foi preciso projetar um circuito gerador de *clock*, dada a necessidade do FLIP FLOP. Como a diferença do tempo de comutação dos TRIACs é de apenas um ciclo de senóide, e como o acionamento dessas comutações poderia causar um curto circuito, optou-se por desenvolver o circuito para gerar a onda quadrada em sincronismo com a onda senoidal da rede.

Na entrada do circuito, alimentado pelo TR2, foi projetado um divisor de tensão composto por 3 resistores de  $1K\Omega$ , os mesmos fornecem tensões diferentes na entrada não inversora e na entrada inversora do amplificador operacional LM741, que, por sua vez, faz a comparação destas, saturando positivamente, ou negativamente, como consequência disso, em sua saída fornece uma onda quadrada. Contudo, foi utilizada uma tensão de alimentação positiva em  $V+$  e GND em  $V-$ , este, em divergência com o que é indicado no datasheet, que assinala tensão negativa. Em virtude disso, a onda na saída acaba tendo um deslocamento positivo, conforme a Figura 35.

Figura 35: Deslocamento DC da onda quadrada e “*duty cycle*”

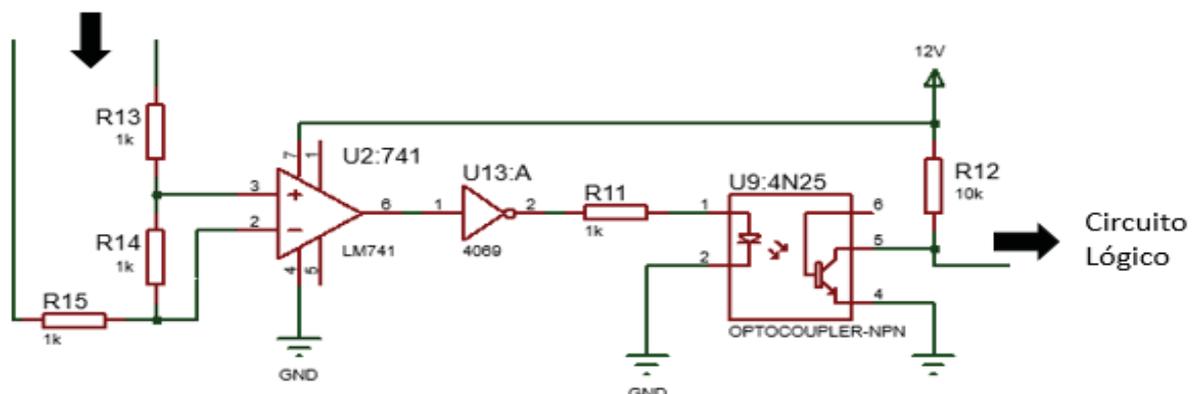
Fonte: Próprio autor

Também é possível observar uma pequena diferença no *duty cycle*, porém, este, não causou problemas ao funcionamento do sistema.

Diante do deslocamento DC identificado, foi projetado um complemento no circuito, com objetivo de corrigir o problema. Na saída do LM741, foi instalado uma porta NOT do CI CD4069, com o intuito de transformar o sinal de 4,5V em 0V e também transformar o sinal de 1,3V em 5V, visto que a porta NOT reconhece um ativo alto apenas tensões acima de 2,5V. O deslocamento de 180° entre a onda senoidal e a onda quadrada, não interfere no funcionamento do circuito.

Afim de garantir uma maior estabilidade, ainda foi instalado um optocoplador 4N25, com um resistor limitador de corrente de 1KΩ na entrada, e um resistor limitador de corrente de de 10KΩ na saída. A Figura 36 apresenta circuito projetado.

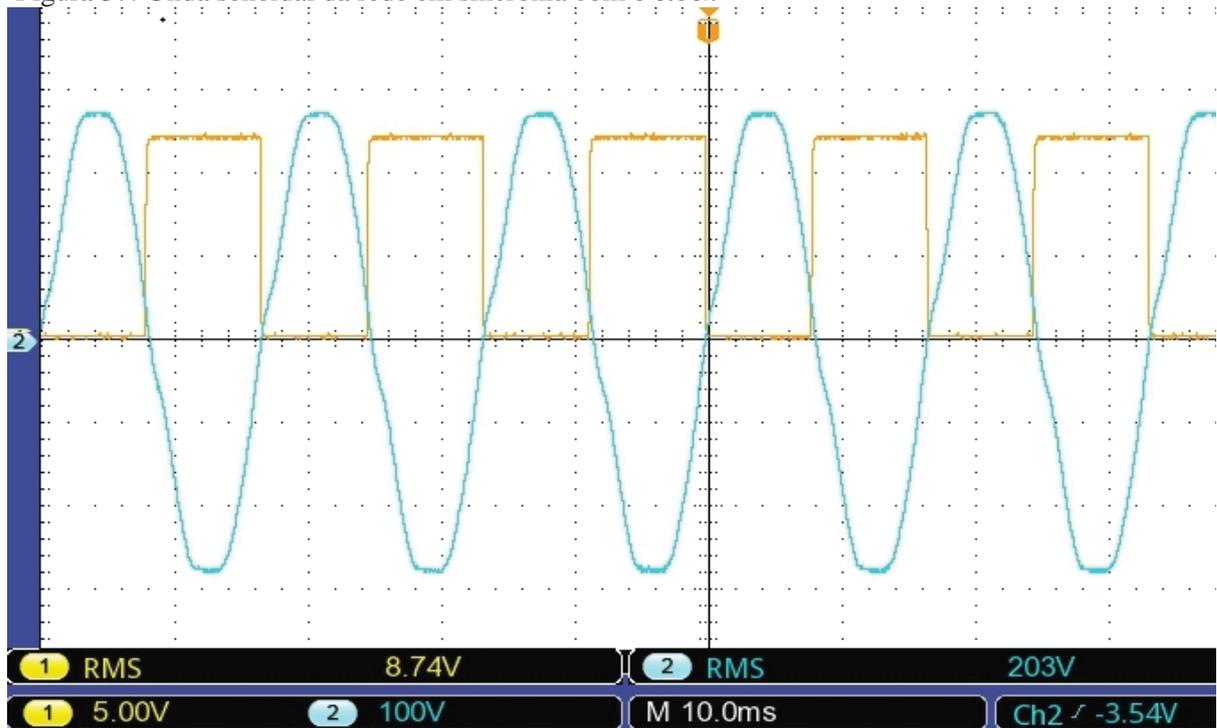
Figura 36: Circuito gerador de *clock*  
TR 220/6V



Fonte: Próprio autor

O resultado final da etapa, pode ser verificado na Figura 37, onde a onda quadrada se encontra em perfeita sincronia com a onda senoidal recebida, da rede elétrica, apenas deslocada em 180°, que conforme frisado anteriormente, não influencia no funcionamento do circuito, visto que, os TRIACs, comutam na passagem por zero em ambos os sentidos da senóide.

Figura 37: Onda senoidal da rede em sincronia com o *clock*



Fonte: Próprio autor

### 3.5 CIRCUITO DE POTÊNCIA

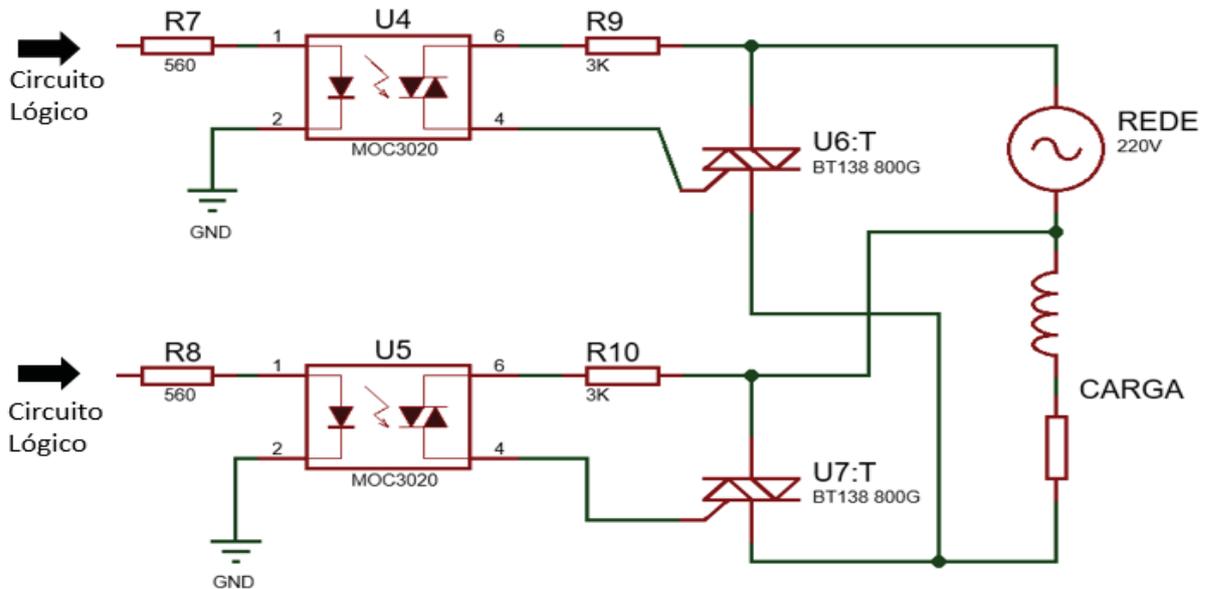
Concluídos os dimensionamentos e circuitos eletrônicos, a próxima etapa do projeto é o acionamento do circuito de potência, o qual identifica-se pelo acionamento ou não da bobina primária do autotransformador, onde esta tensão, deve ser totalmente isolada do circuito eletrônico, dada a grande diferença de potencial existente entre ambos.

A presente etapa, inicia-se com a inclusão dos resistores R7 e R8, de 560Ω, nas entradas (pino 1), de 2 opto acopladores, do tipo MOC3020, a fim de limitar a corrente que circula através do diodo emissor de luz que existe dentro do referido CI em 20 mA.

Conectados ao pino 6 dos opto acopladores, foram projetados os resistores R9 e R10, de 180Ω, que também tem o objetivo de reduzir a corrente que circula através do TRIAC interno do MOC 3020, para 100mA.

A partir dos resistores ligados ao pino 6, definiu-se a instalação de 2 TRIACs do tipo BT139 800G, que são os reais responsáveis por acionar a carga, e por isso, estes, tem capacidade de corrente de 12A RMS, em regime permanente, e até 800V de pico em estado repetitivo. A Figura 38 ilustra o circuito de potência proposto.

Figura 38: Circuito de Potência com MOC e TRIACs



Fonte: Próprio autor

A partir do ensaio, com o circuito da Figura 38, foi constatado, que os TRIACs não apresentaram estabilidade nos disparos para a comutação dos *taps* do autotransformador, os mesmos apresentaram acionamentos indevidos, causando assim, curto circuito no sistema. Diante dessa situação, o uso desses componentes foi descartado, pois, mesmo com o atraso das comutações, o sistema não se mostrou eficiente.

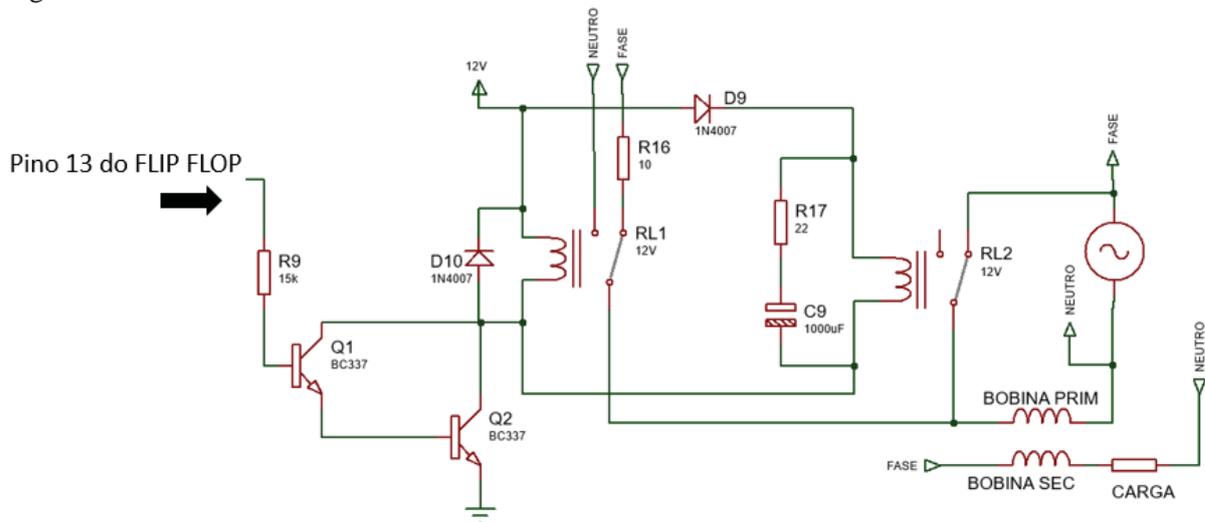
Foram realizados alguns ensaios, onde foi possível observar que ocorriam disparos aleatórios nos TRIACs, causando curto-circuito na saída, e consequentemente danificando os mesmos. Ainda, para possibilitar a eliminação desses problemas, foi testada uma associação de resistores e capacitores, entre os optoacopladores e os TRIACs, porém nesse caso ocorreu uma dissipação muito grande de potência, o que, danificou os resistores.

Como uma segunda opção, foi desenhado um circuito de potência, com a utilização de dois relés eletromagnéticos em série, para realização das comutações necessárias. Nesse caso, o Circuito lógico, e o Circuito gerador de onda quadrada se tornaram dispensáveis, no entanto, ligando o circuito de potência diretamente ao pino 1 do amplificador operacional LM324, o sistema apresentou uma falha na comutação, o que, não acontece com o sinal do pino 13 do FLIP FLOP, que apresenta um sinal de comutação bastante estável. Esta condição ocorre pois,

a entrada de comparação é muito sensível a surtos da rede elétrica, já a saída do flip-flop somente comuta nas transições do *clock*.

A partir do FLIP FLOP, foi projetado um circuito Darlington, com 2 transistores do tipo BC337, que tem como objetivo fornecer uma corrente elevada o suficiente para realizar o chaveamento dos relés. Logo, o pino 13 do FLIP FLOP passou a alimentar a base de um dos transistores BC337. O circuito de potência pode ser visualizado na Figura 39.

Figura 39: Circuito de Potência com transistores e relés



Fonte: Próprio autor

Para o dimensionamento desse circuito, primeiramente foi verificado laboratorialmente a resistência da bobina do relé, que é de  $76 \Omega$ , a partir desse valor, encontra-se a corrente dos mesmos conforme a Equação 14. Para o RL1 a tensão sobre a bobina será  $(12 - V_{ce})$ , já para o RL2 a tensão sobre a bobina será  $(12 - V_{ce} - 0,7)$ , assim as correntes serão

$$I_R = \frac{V_{CC}}{R} \quad I_R = \frac{(12-0,4)}{76} \quad I_R = 152 \text{ mA} \quad (14)$$

$$I_R = \frac{V_{CC}}{R} \quad I_R = \frac{(12-0,4-0,7)}{76} \quad I_R = 143 \text{ mA} \quad (14)$$

Onde:

$I_R$  = Corrente do Relé;

$R$  = Resistência;

De posse das correntes dos relés, e sabendo que a corrente máxima de coletor do BC337 é de 800 mA, tem-se que as correntes dos relés totalizam 295 mA e ainda é possível circular 505 mA. O emprego de 2 relés, tem como finalidade, evitar elevadas sobrecorrentes de magnetização *in rush* no momento em que a bobina primária é acionada.

O relé RL1, faz o chaveamento instantaneamente, já, o relé RL2, foi projetado de maneira que o seu chaveamento se atrase, em aproximadamente 4 ciclos de senóide, ou seja, 60ms.

Para realizar o dimensionamento do circuito de atraso do RL2, primeiramente foi realizado o ensaio do relé, com o intuito de descobrir em qual tensão o mesmo volta ao seu estado normal, ou seja, normalmente fechado, e, foi verificado que isso ocorre com 4V em seus terminais.

Além disso, foi definido um valor para o resistor R17, considerando-se o limite máximo de corrente que pode circular pelo coletor do transistor BC337, com o já definido anteriormente em 505mA. Sobre o capacitor no momento do seu acionamento a tensão será (12 – 0,4 – 0,7) e aplicando a Equação 14, tem-se.

$$I_R = \frac{V_{CC}}{R} \quad 550 \text{ m} = \frac{(12-0,4-0,7)}{R} \quad R = 19,8 \Omega \quad (14)$$

Assim, foi definido o valor do resistor R17 em 22  $\Omega$

Definido esse resistor, o próximo passo é determinar a tensão sobre o capacitor que promoverá os 4 V de tensão sobre o relé. A partir da corrente circulante e sabendo que no instante de desligamento o capacitor fornecerá tensão para o resistor de 22  $\Omega$  e para o relé, tem-se a corrente circulante conforme a Equação 15.

$$I_C = \frac{V_C}{R_B} \quad I_C = \frac{4}{76} \quad I_C = 53 \text{ mA} \quad (15)$$

Onde:

$I_C$  = Corrente no Capacitor;

$V_C$  = Tensão no capacitor;

$R_R$  = Resistência do Relé;

A partir da corrente, é possível encontrar a tensão sobre o capacitor através da Equação 16.

$$V_C = I_C \cdot (R_R + R17) \quad V_C = 0,053 \cdot (74 + 22) \quad V_C = 5,09 \text{ V} \quad (16)$$

Através dos dados calculados, e, com um tempo de atraso definido em 60ms, conforme, necessidade verificada em ensaio, partimos para a Equação 17, para o dimensionamento do capacitor eletrolítico C9.

$$V_C = -V_{MAX} \cdot e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} \quad (17)$$

$$5,19 = -10,6 \cdot e^{\left(\frac{-60\text{m}}{(74+22) \cdot C}\right)} \quad C = 875 \mu\text{F}$$

Logo, define-se pelo uso de um capacitor de 1000 $\mu$ F.

Para a corrente de saída do flip-flop, tem-se que a corrente irá se aproximar de 800 mA, e a configuração Darlington dos dois transistores BC 337, irão promover o produto dos dois hfe, o valor da corrente é definido pela Equação 18.

$$I_B = \frac{I_c}{hfe} \quad I_B = \frac{800m}{150 \times 150} \quad I_B = 0,035mA$$

(18)

Onde:

$I_B$  = Corrente de Base;

$I_c$  = Corrente de Coletor;

$\beta$  = Ganho;

Na Equação 19, é calculado o valor da resistência R9.

$$R9 = \frac{VCC - V_{BE1} - V_{BE2}}{I_B} \quad R9 = \frac{12V - 0,7 - 0,7}{0,035m} \quad R9 = 302 K\Omega \quad (19)$$

Onde:

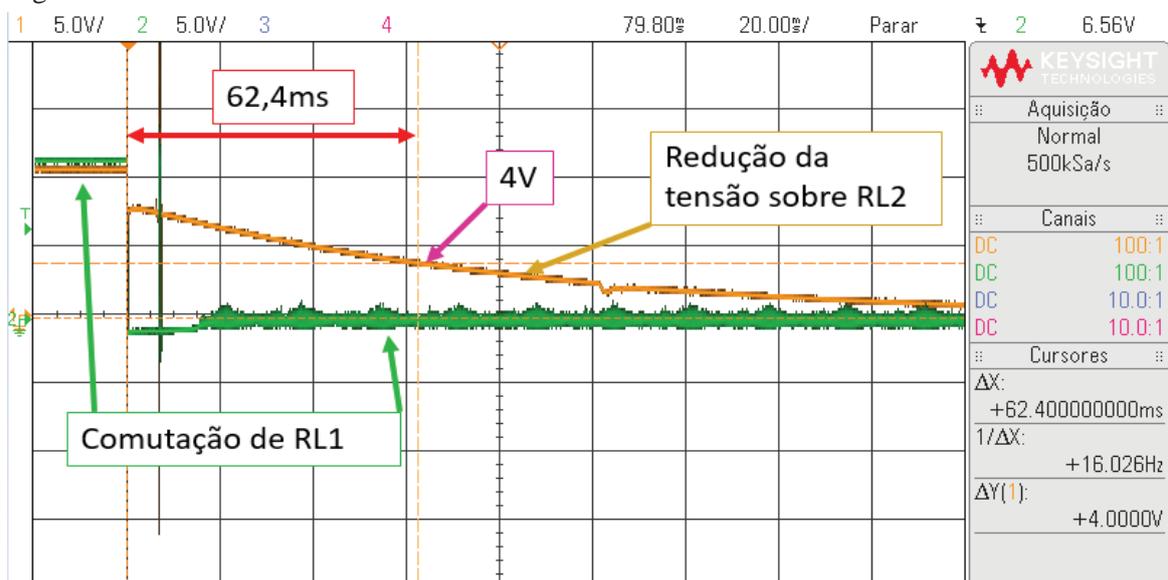
$V_{BE1}$  = Tensão Base Emissor do transistor 1;

$V_{BE2}$  = Tensão Base Emissor do transistor 2;

Assim, sabendo que a corrente de saída do flip-flop é no máximo de 5 mA, foi definido um resistor de 15K $\Omega$  para R9, que irá produzir uma corrente de 0,7 mA, levando os transistores a saturação e não comprometendo a corrente do flip-flop.

O atraso gerado promovido, pode ser visualizado na Figura 40, a qual apresenta o ensaio realizado.

Figura 40: Atraso no fechamento de RL2



Fonte: Próprio autor

O tempo obtido foi de 62,4ms, para a tensão reduzir aos 4V propostos e ensaiados, ou seja, na tensão em que o relé retorna para sua posição inicial.

Além dos componentes dimensionados, também foram projetados 2 diodos do tipo 1N4007, sendo que o primeiro foi instalado como diodo de roda livre, e está entre o borne positivo e o negativo da bobina de RL1, já o segundo, foi projetado entre a fonte VCC e o borne positivo da bobina do RL2, com objetivo de evitar que a corrente do capacitor retorne para o RL1.

Com o objetivo de limitar a corrente *in rush*, em 22 A, que é 2 vezes a corrente nominal primária do autotransformador, foi projetado um resistor R16, conforme a Equação 20.

$$R_{16} = \frac{V_R}{I_R} \quad R_{16} = \frac{220}{22} \quad R_{16} = 10\Omega \quad (20)$$

Onde:

$V_R$  = Tensão da rede;

$I_R$  = Corrente da rede;

Considerando-se que a temperatura do resistor, demora 30 segundos para equilibrar, define-se a potência dissipada no resistor R16 através da Equação 21.

$$P_D = \frac{I^2 \cdot R}{t_S} \quad P_D = \frac{22^2 \cdot 10}{30} \quad P_D = 161W/s \quad (21)$$

Na Equação 22, será verificada a potência dissipada por apenas 60ms.

$$P_D = P_D \cdot t \quad P_D = 161 \cdot 0,06 \quad P_D = 9,66W \quad (22)$$

Portanto, foi definido um resistor de 10Ω/10W.

### 3.6 PROJETO DO AUTOTRANSFORMADOR

Por se tratar de um sistema laboratorial, o presente foi desenvolvido para uma corrente nominal de apenas 10A, afim de possibilitar os mais variados testes, com cargas consideravelmente elevadas para o transformador.

Considerando-se a robustez proposta, o autotransformador foi projetado com apenas um *tap* para ajuste da tensão sobre a carga, esse, por sua vez, deve fazer um incremento de 23V, porém, já é prevista uma queda de tensão no equipamento, e, assim a elevação de tensão efetiva será de 21V. A injeção de tensão será realizada, quando a tensão da rede se aproximar dos níveis considerados precários no Módulo 8 do PRODIST.

Estabelecidas essas características, a partir da Equação 23, é calculada a potência do autotransformador:

$$P_{VA} = V_2 \cdot I_2 \qquad P_{VA} = 23.10 \qquad P_{VA} = 230VA \qquad (23)$$

Onde:

$P_{VA}$  = Potência Ativa;

$V_2$  = Tensão do secundário;

$I_2$  = Corrente do secundário;

A tensão primária foi definida para o projeto em 200 V e com base nesse dado, na Equação 24, é calculada a corrente  $I_S$ :

$$I_S = \frac{P_{VA}}{V_1} \qquad I_S = \frac{230}{200} \qquad I_S = 1,15A \qquad (24)$$

Onde:

$I_S$  = Corrente de magnetização;

$V_1$  = Tensão do primário;

Portanto, a corrente  $I_1$ , é calculada com base na equação 25:

$$I_1 = I_2 + I_S \qquad I_1 = 10 + 1,15 \qquad I_1 = 11,15A \qquad (25)$$

Onde:

$I_1$  = Corrente do primário;

Mencionados esses dados, o autotransformador do projeto é especificado da seguinte maneira:

- Autotransformador monofásico somador;
- Corrente nominal de 11,15A;
- Potência ativa de 230VA;
- Tensão mínima para ajuste, 200V;
- Frequência de 60Hz;
- Núcleo toroidal enrolado com lâminas de aço silício de GO;
- Lâminas de 0,3mm de espessura;
- Perdas nas lâminas de 1,3W/Kg a 1,7T;

### 3.6.1 Dimensionamento do núcleo

Definida a utilização do núcleo toroidal enrolado, com chapas de Grão Orientado, o próximo passo é o dimensionamento da área do núcleo, através da Equação 26:

$$A_N = K \cdot \sqrt{P_{VA}} \quad A_N = 1,2 \cdot \sqrt{230} \quad A_N = 18,2 \text{cm}^2 \quad (26)$$

Onde:

$K$  = Constante de projeto;

$A_N$  = Área do núcleo;

A partir da área do núcleo, na equação 27, é possível ver as dimensões para uma área de formato quadrado:

$$S_M = \sqrt{A_N} \quad S_M = \sqrt{18,2} \quad S_M = 4,266 \text{cm}^2 \quad (27)$$

Onde:

$S_M$  = Secção magnética;

Portanto, define-se o tamanho dos lados do toróide:

- $L=4,5\text{cm}$ ;
- $P=4,045\text{cm}$ ;

Onde:

$L$  = Largura da área magnética;

$P$  = Pacote;

Projetadas as dimensões do núcleo, a sequência é calcular o número de voltas da lâmina de 0,3mm de espessura de aço silício, que são necessárias para se chegar a tal tamanho, assim definida pela Equação 28:

$$N_V = \frac{P(\text{mm})}{E_L} \quad N_V = \frac{40,45}{0,3} \quad N_V = 134,8 \text{voltas} \quad (28)$$

Onde:

$N_V$  = Número de voltas da lâmina;

$E_L$  = Espessura da lâmina;

Para execução do projeto, foram previstas 135 voltas.

### 3.6.2 Dimensionamento dos condutores de cobre

Obtidas as características do núcleo, no presente item, projeta-se os condutores elétricos dos enrolamentos, os quais são propostos em cobre. Inicialmente, é definida a quantidade de Volts por espiras, pela Equação 29:

$$\frac{e}{N_2} = 4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_M \cdot 10^{-4} \quad \frac{e}{N_2} = 4,44 \cdot 60 \cdot 1,74 \cdot 266 \cdot 10^{-4} \quad (29)$$

$$\frac{e}{N_2} = 0,193V/e$$

Onde:

$e$  = Espirra;

$N_2$  = Número de espirras no secundário;

$f$  = Frequência;

$B$  = Densidade de Fluxo Magnético;

Portanto, para obter-se 23V, temos que  $N_2 = 119e$ .

Logo, por meio da relação da Equação 30, obtem-se o valor de  $N_1$ :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \qquad \frac{N_1}{119} = \frac{200}{23} \qquad N_1 = 1050e \qquad (30)$$

Onde:

$N_1$  = Número de Espirras do primário;

$V_1$  = Tensão no primário;

Para calcular a secção transversal dos fios de cobre, projeta-se uma densidade de corrente média de 2,5A/mm<sup>2</sup>, assim através da Equação 31 e da Equação 32 define-se as secções condutoras do enrolamento primário e secundário do autotransformador.

$$S_P = \frac{I_1}{d} \qquad S_P = \frac{1,15}{2,5} \qquad S_P = 0,46mm^2 \qquad (31)$$

$$S_S = \frac{I_2}{d} \qquad S_S = \frac{10}{2,5} \qquad S_S = 4mm^2 \qquad (32)$$

Onde:

$S_P$  = Secção transversal do fio primário;

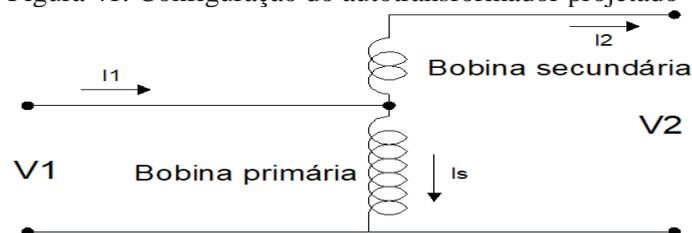
$S_S$  = Secção transversal do fio secundário;

$d$  = Densidade de corrente;

Portanto, foi utilizado um fio AWG 21 para o enrolamento primário, e 2 fios AWG 14 para o secundário do autotransformador, afim de facilitar o enrolamento do deste.

Na Figura 41 é possível observar a configuração do autotransformador projetado.

Figura 41: Configuração do autotransformador projetado



Fonte: Próprio autor

### 3.7 FONTE CC PARA OS COMPONENTES ELETRÔNICOS

#### 3.7.1 Transformador do Circuito de Alimentação

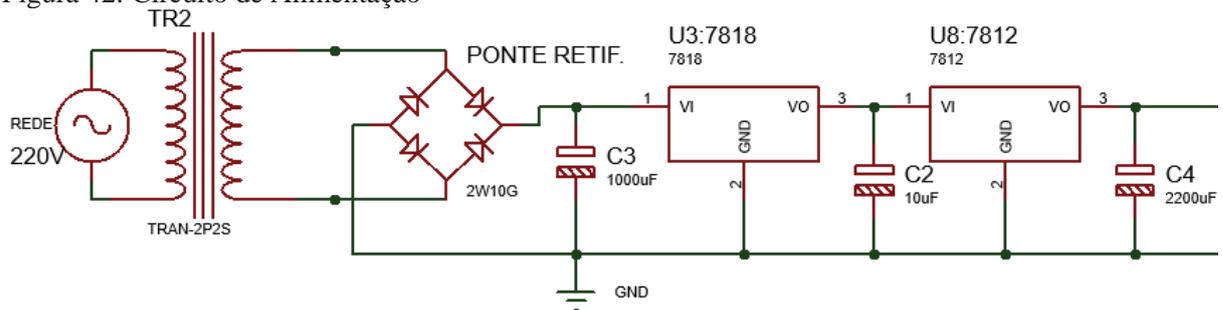
O Transformador da Fonte foi projetado com o objetivo de garantir os 12V contínuos propostos para a alimentação dos componentes. Por este motivo foi definido conforme segue:

- Tensão de entrada: 220V;
- Tensão de saída: 9V + 9V;
- Corrente do secundário: 1A;
- Frequência: 60Hz.

#### 3.7.2 Circuito de Alimentação

A saída de 18V do TR2 é conectada diretamente a uma ponte retificadora do tipo 2W10G que pode fornecer até 2A em regime permanente, com sua entrada em 1000V de pico máximo. Devido a elevada tensão recebida da ponte, de 18V RMS, ou seja 25,45V de pico, foram projetados 2 reguladores de tensão, sendo o primeiro, um LM7818, que reduz a tensão para 18V e o segundo, um LM7812, que reduz a tensão para os 12V desejados, como pode ser verificado na Figura 42.

Figura 42: Circuito de Alimentação



Fonte: Próprio autor

A utilização de dois reguladores de tensão, tem por objetivo diminuir a dissipação de calor. Foram verificadas as correntes de todos componentes eletrônicos, que chegaram a um montante de 350mA. Considerando essa corrente de carga, a Equação 33 e a Equação 34, demonstram a potência dissipada sobre os reguladores de 18V e 12V respectivamente.

$$PD = (V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I_L \quad PD = (25,45 - 18) \cdot 0,350 \quad (33)$$

$$PD = 2,6W$$

$$PD = (V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I_L \quad PD = (18 - 12) \cdot 0,350 \quad (34)$$

$$PD = 2,1W$$

Como a potência dissipada pelos circuitos integrados é maior que 2W, existe a necessidade de instalação de dissipador de calor.

Entre a ponte retificadora e o regulador de tensão de 18V, foi previsto um capacitor eletrolítico, com a finalidade de filtrar os ruídos e também tornar a tensão mais contínua, ou seja, reduzir a oscilação da mesma. A equação 35 apresenta o cálculo deste capacitor.

$$C = T \cdot \frac{I_{max}}{V_{ripple}} \quad C = 8,3m \cdot \frac{150m}{1,5} \quad C = 830\mu F \quad (35)$$

Definiu-se, portanto, um capacitor de 1000uF, afim de garantir maior estabilidade na tensão e reduzir ainda mais os ruídos.

Entre o regulador de tensão de 18V e o de 12V, também foi projetado um capacitor eletrolítico de 10uF, apenas de filtro, para pequenas variações.

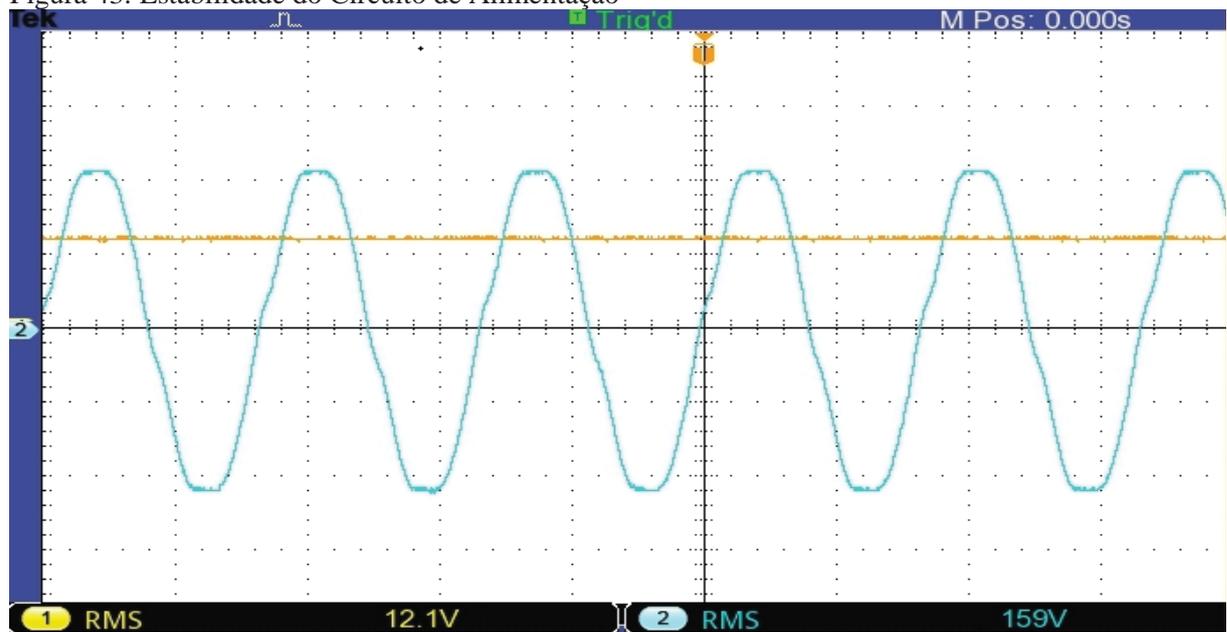
Após o regulador de 12V, a tensão ainda apresentava uma pequena oscilação, e, portanto, foi necessário dimensionar outro capacitor, conforme Equação 36.

$$C = T \cdot \frac{I_{max}}{V_{ripple}} \quad C = 8,3m \cdot \frac{150m}{0,6} \quad C = 2075\mu F \quad (36)$$

Para este, foi definido um capacitor de 2200uF.

Como o protótipo deve atuar em quedas de tensão oriundas da rede de distribuição, é de extrema importância que o circuito de alimentação garanta os 12V, mesmo com quedas acentuadas. Nesse sentido, pode-se verificar através da Figura 43, que, mesmo com uma tensão da rede de 159V, a fonte fornece 12,1V para o circuito, teste esse, realizado com todos os componentes alimentados. Isso é necessário, para garantir o acréscimo de tensão, nas piores condições possíveis.

Figura 43: Estabilidade do Circuito de Alimentação



Fonte: Próprio autor

Quando o transformador da fonte é alimentado por 220V, ele é capaz de fornecer em sua saída uma tensão de 18V, reduzindo-se a tensão da rede para 159V, o secundário passa a fornecer 13V, devido a sua relação de transformação  $\alpha$ . Os 13V RMS, correspondem a 18,3V de pico.

Antes de chegar ao regulador LM7818, ainda existe uma queda de tensão nos diodos da ponte, de 1,4V, e, portanto, a tensão que chega ao regulador é de 16,9V, valor que é insuficiente para o regulador de 18V, porém, o regulador LM7812 pode operar perfeitamente.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos do protótipo desenvolvido, a fim de confirmar os objetivos propostos.

Para possibilitar a realização dos testes, foi utilizado um Variac monofásico, que possui uma excursão de variação de 0V até 280V.

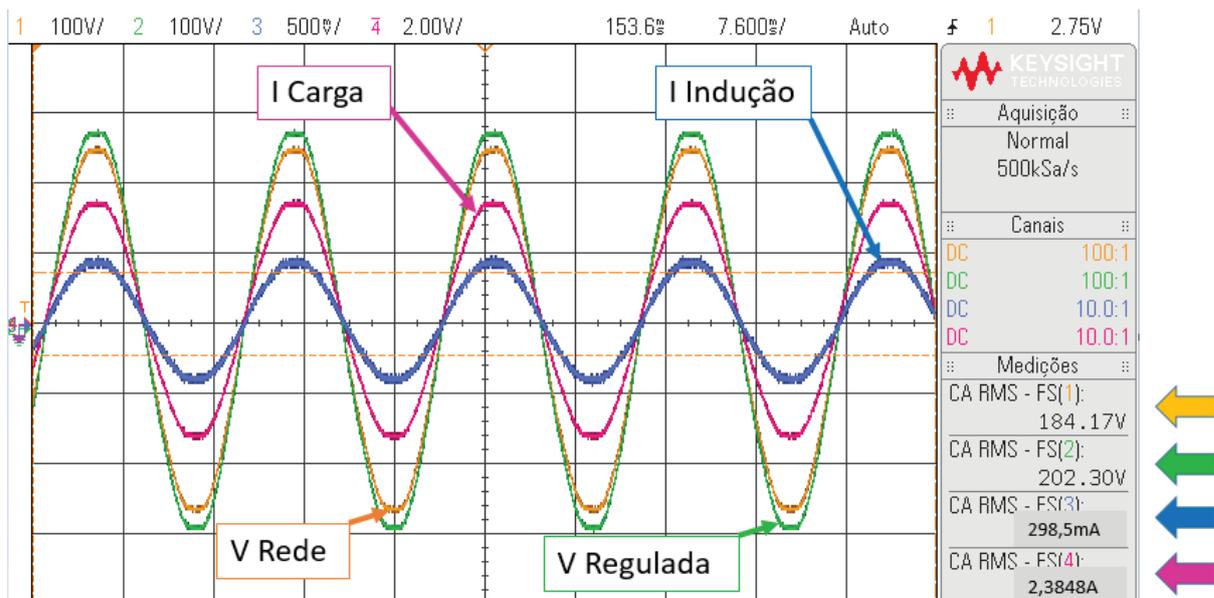
Foram avaliados os resultados referentes a regulação, no momento em que os níveis de tensão da rede estão aumentando, e também quando estes estão diminuindo, observando-se a histerese, e o sinal de comutação recebido do circuito eletrônico. Os ensaios foram elaborados com carga R, RL e RC.

### 4.1 ENSAIO COM CARGA RESISTIVA

Esse primeiro ensaio, foi realizado com uma carga resistiva de 600 W nos bornes secundários do autotransformador.

Inicialmente, reduziu-se a tensão de entrada, até que a tensão regulada atingisse um valor mínimo, porém, em parâmetros adequados do PRODIST, acima de 202V, como pode ser observado na Figura 44.

Figura 44: Tensão em faixa crítica regulada para faixa adequada com carga R

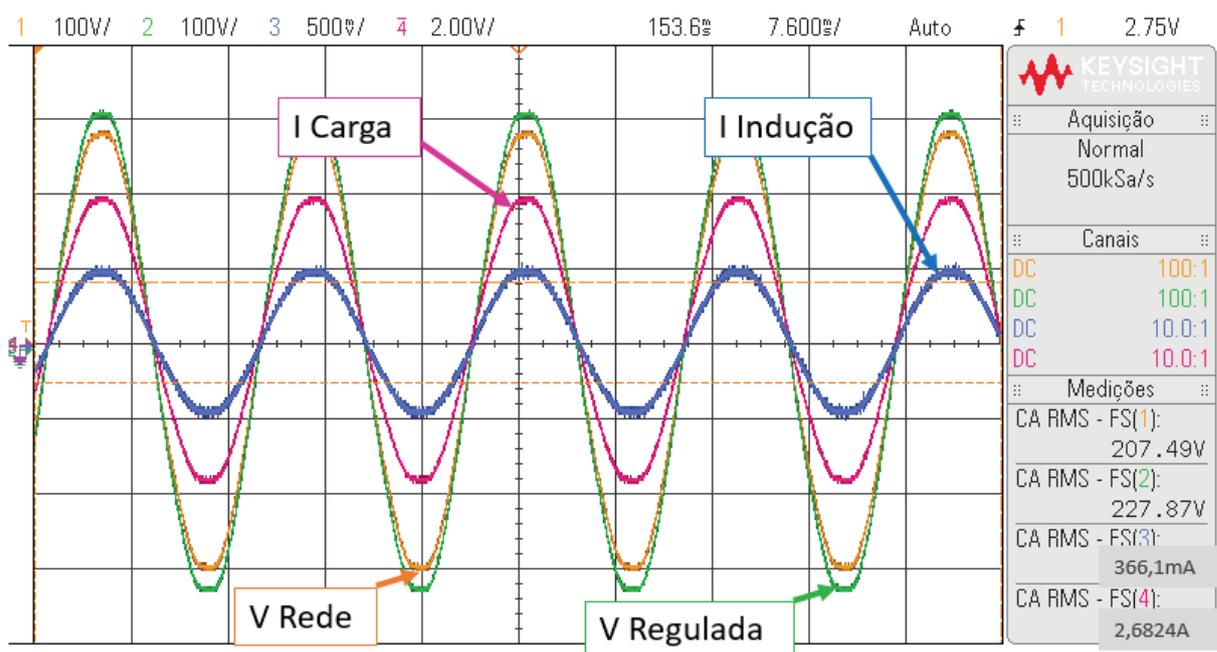


Fonte: Próprio autor

Na condição ensaiada e visualizada, é importante observar, que mesmo com uma queda de tensão a valores críticos, no caso, 184,17V, o protótipo conseguiu elevar a tensão para o parâmetro adequado, com uma tensão de 202,3V, isto é, a bobina primária induziu 18,13V na secundária.

Na Figura 45, a tensão foi elevada até o limite, antes da comutação que modifica a relação de transformação do autotransformador, desligando a bobina primária.

Figura 45: Tensão no limite superior antes da comutação com carga R

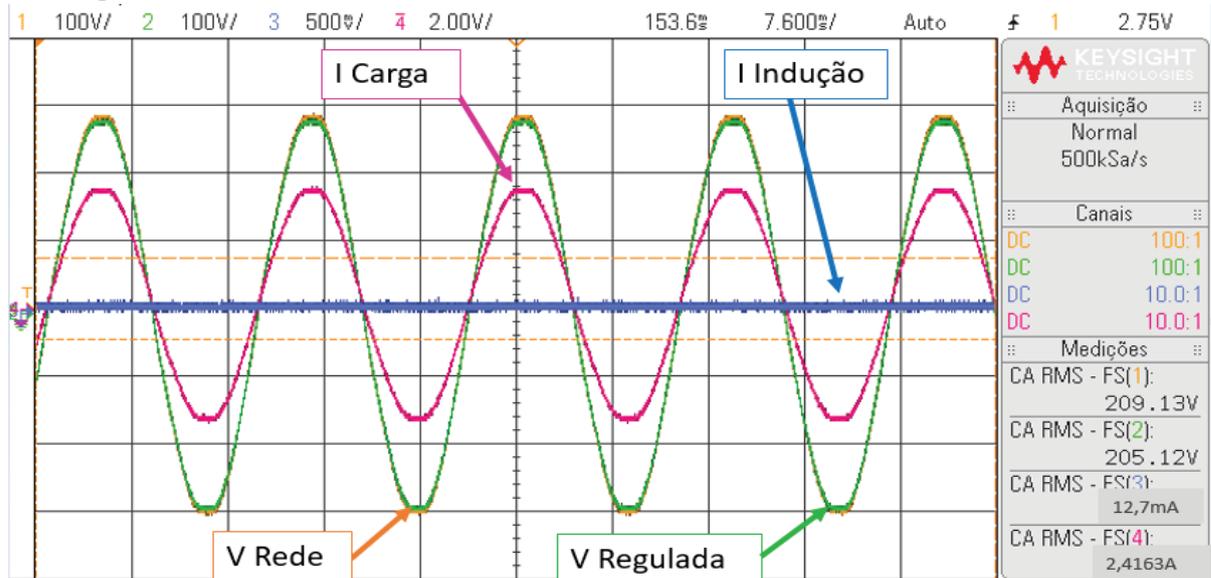


Fonte: Próprio autor

Como a tensão de comutação no momento da elevação é projetada para 208V, quando a tensão se aproxima desse valor, e ainda existe a indução do circuito primário, esta, deve aumentar a tensão para um valor abaixo dos níveis precários de sobre tensão, isto é, 231V, como pode ser verificado o valor de saída está em 227,87V.

Quando a tensão ultrapassa 208V, a carga passa a ser alimentada apenas pelo enrolamento secundário, e nesse caso, essa bobina gera uma queda de aproximadamente 4 V, sobre a carga, conforme a Figura 46.

Figura 46: Tensão sobre a carga alimentada apenas através da bobina secundária do autotransformador com carga R

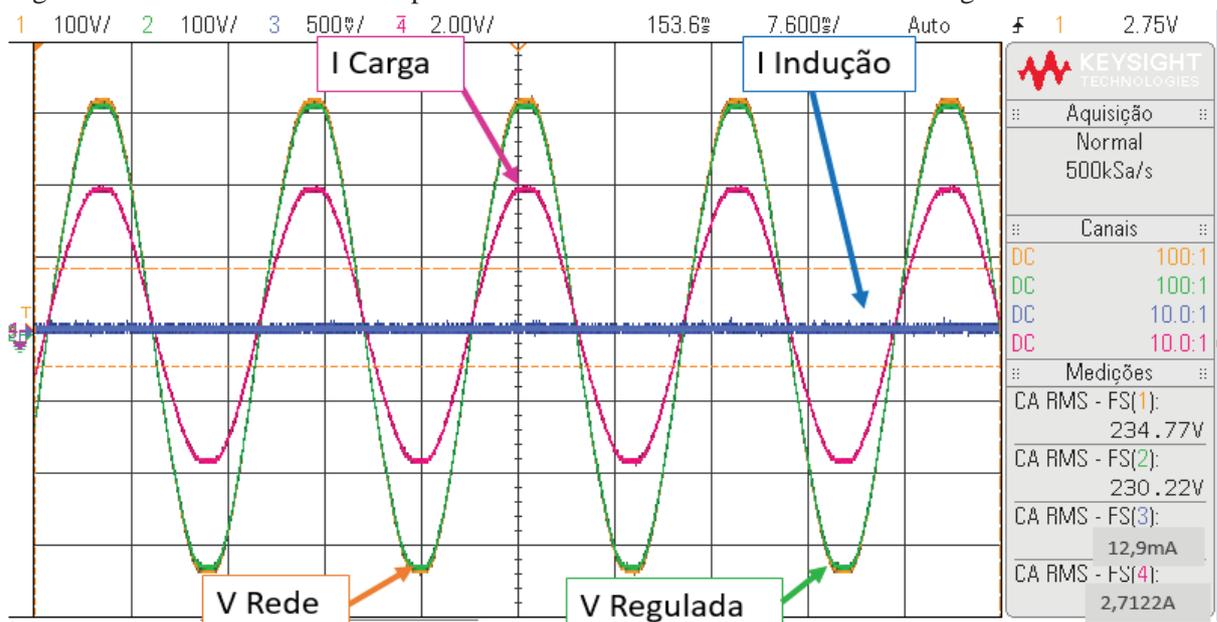


Fonte: Próprio autor

Nesta imagem, também é possível verificar que no canal 3 do osciloscópio, ou seja, na bobina do primário do autotransformador, não existe corrente elétrica.

A queda de tensão de aproximadamente 4V identificada na Figura 46, acaba por se tornar benéfica, quando a rede está com sobretensão, na Figura 47, é demonstrado que, com uma tensão de entrada de 234,77V, ou seja, em faixa crítica, na saída existe uma tensão de 230,22V, portanto, dentro da faixa adequada de tensão.

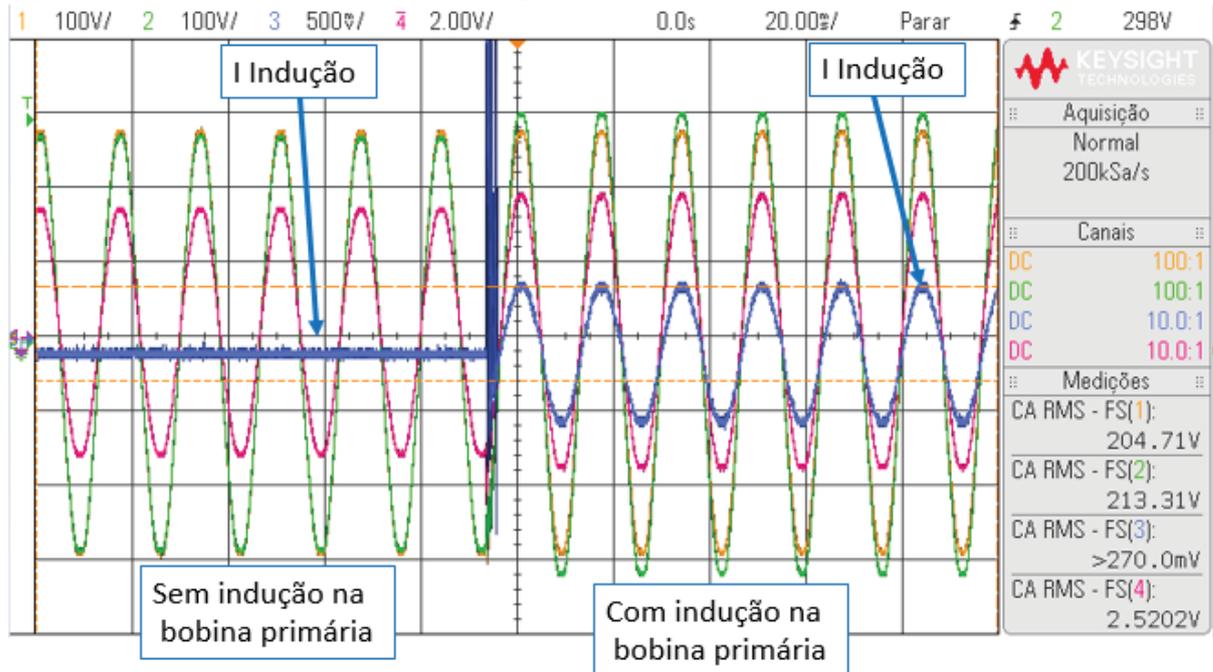
Figura 47: Sobretensão absorvida pelo secundário do autotransformador com carga R



Fonte: Próprio autor

Para obter uma visão geral do funcionamento do equipamento com carga resistiva, será apresentado o momento de transição da comutação com carga, conforme ilustrado na Figura 48.

Figura 48: Comutação do protótipo com carga R



Fonte: Próprio autor

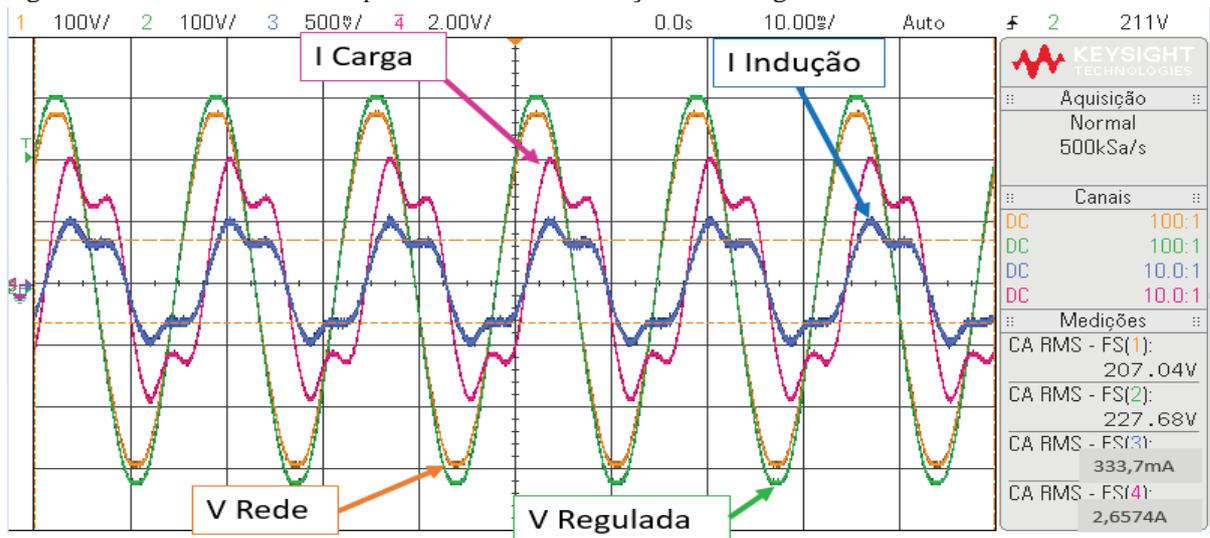
Nesse caso, a tensão da rede estava dentro dos parâmetros adequados, porém sofreu uma queda, o que levou o sistema a realizar a comutação, induzindo tensão do enrolamento primário no secundário. O aumento da tensão sobre a carga pode ser visualizado através do canal 2, onde na parte direita tem uma amplitude maior que na esquerda. Também é possível observar o início da circulação de corrente sobre o enrolamento primário no canal 3.

## 4.2 ENSAIO COM CARGA RESISTIVA INDUTIVA

Nesse ensaio, foi utilizado um motor monofásico de 1/2CV, 220V, como carga para o ensaio do autotransformador regulador de tensão.

Para verificar o comportamento, primeiramente, a tensão foi elevada até o limite anterior a comutação, que no caso desliga, o enrolamento primário, essa situação pode ser analisada na Figura 49.

Figura 49: Tensão no limite superior antes da comutação com carga RL

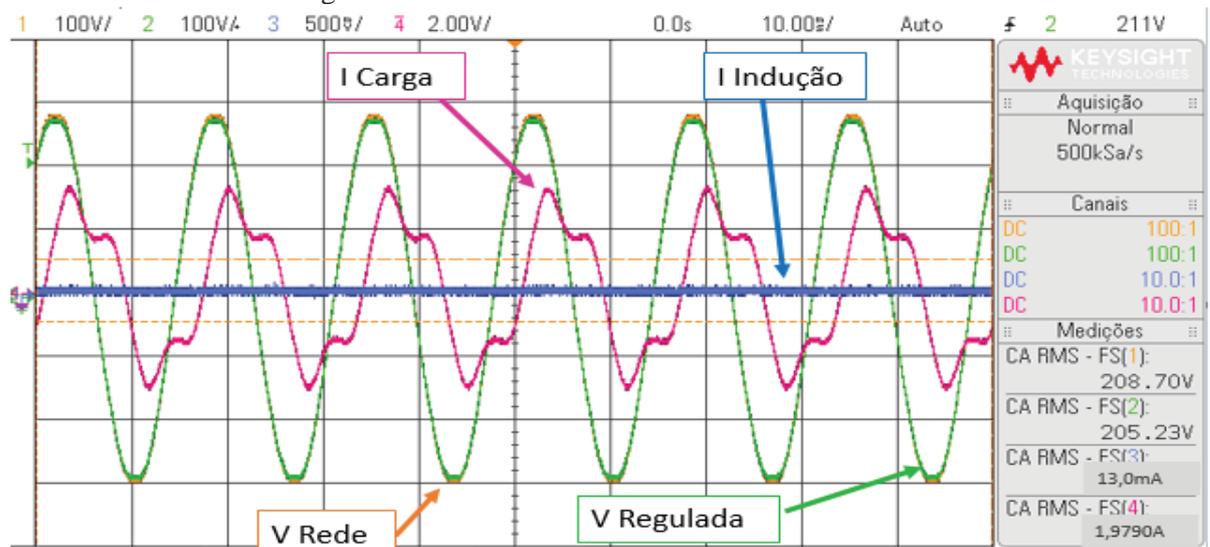


Fonte: Próprio autor

Assim como aconteceu na carga resistiva, com uma tensão de rede abaixo de 208V, ponto aonde ainda existe indução do enrolamento primário, a tensão sobre a carga continua dentro dos níveis adequados, quer dizer, abaixo de 231V. A corrente existente no canal 3 é a corrente da bobina primária do autotransformador.

Na sequência, simulando um aumento na tensão da rede, quando essa ultrapassa 208V, pode-se observar que a comutação ocorre, e a carga passa a ser atendida apenas através do enrolamento secundário do autotransformador, isso se comprova pela ausência de corrente no canal 3 do osciloscópio, conforme a Figura 50.

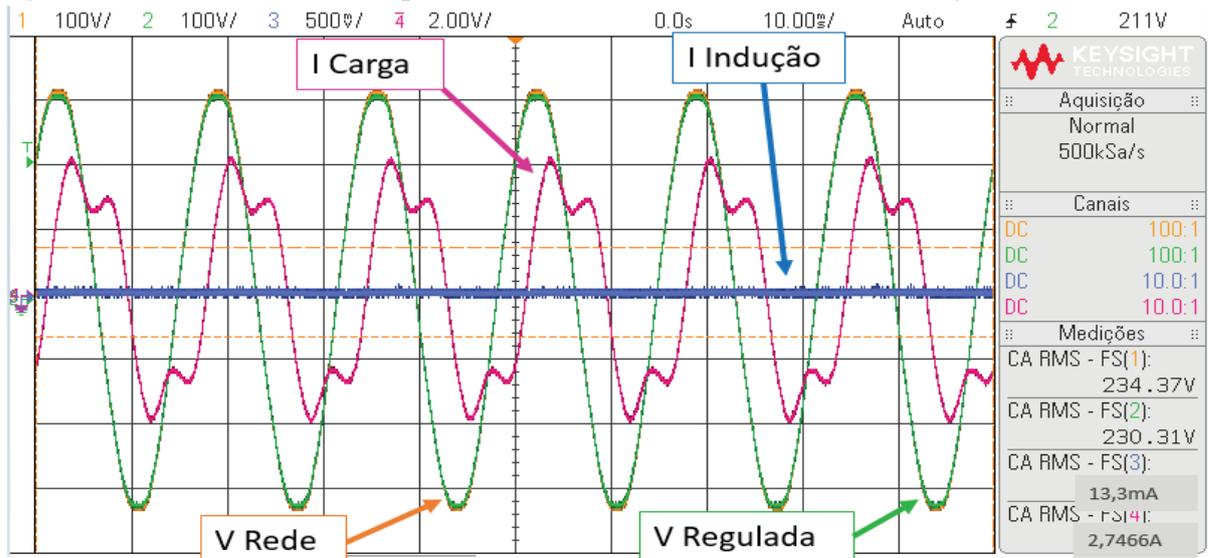
Figura 50: Tensão sobre a carga RL alimentada apenas através da bobina secundária do autotransformador com carga RL



Fonte: Próprio autor

Através da Figura 51, é possível verificar, que a queda de tensão, de aproximadamente 4V, existente com a carga RL e também auxilia na regulação da sobretensão, corrigindo a tensão da rede que está em 234,37V, para 230,31V, portanto, corrigindo de parâmetros críticos para parâmetros adequados.

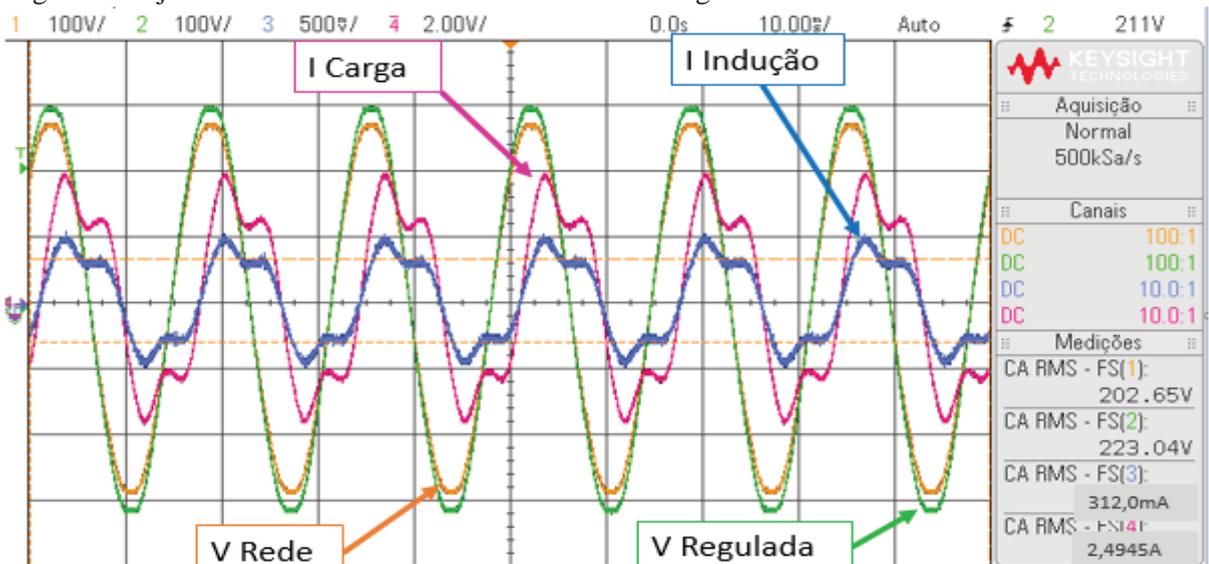
Figura 51: Sobretensão absorvida pelo secundário do autotransformador com carga RL



Fonte: Próprio autor

Concluindo a análise com cargas RL, foi simulada uma redução da tensão da rede, abaixo de 203V, afim de confirmar a comutação e o acréscimo de tensão no secundário, o resultado pode ser observado na Figura 52.

Figura 52: Ajuste de tensão no autotransformador com carga RL



Fonte: Próprio autor

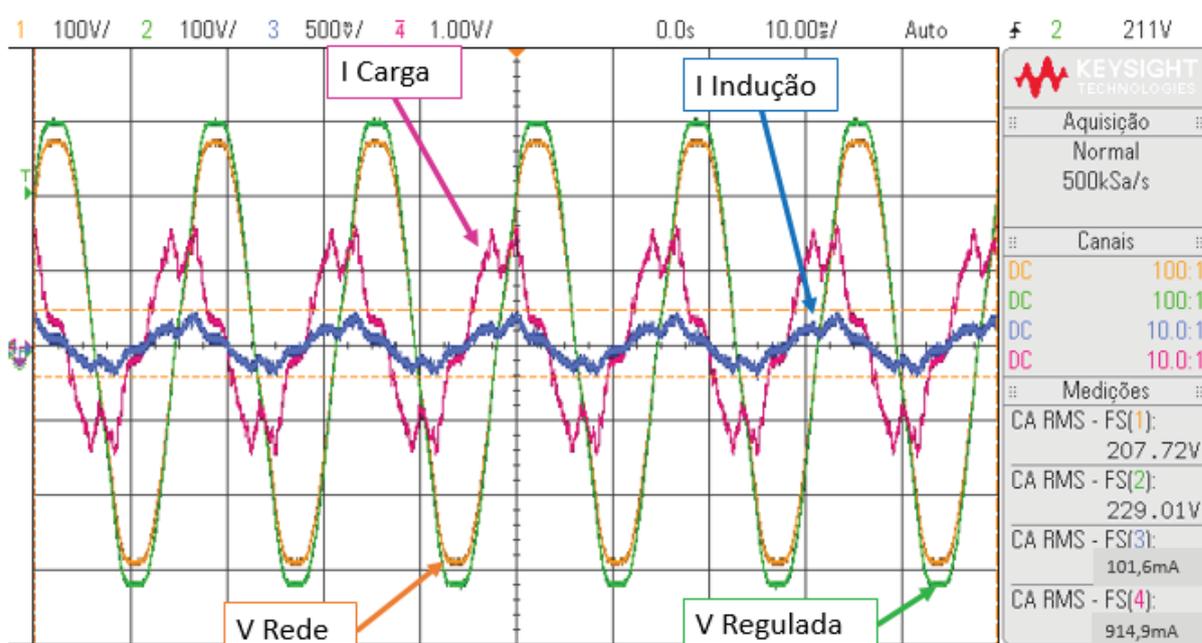
Pode-se notar que com uma tensão de rede de apenas 202,65V, a carga recebe 223,04V, ou seja, existe um acréscimo de 20,39V na carga. O canal 3 representa a corrente sobre o enrolamento primário do autotransformador.

#### 4.3 ENSAIO COM CARGA RESISTIVA CAPACITIVA

Para realizar o referido ensaio, foi utilizada uma lâmpada incandescente de 60W/220V e também, um capacitor de 10 $\mu$ F/220V.

A fim de verificar o comportamento do sistema com esse tipo de carga, a tensão foi elevada, até um valor próximo ao limite de comutação, conforme a Figura 53.

Figura 53: Tensão no limite superior antes da comutação com carga RC

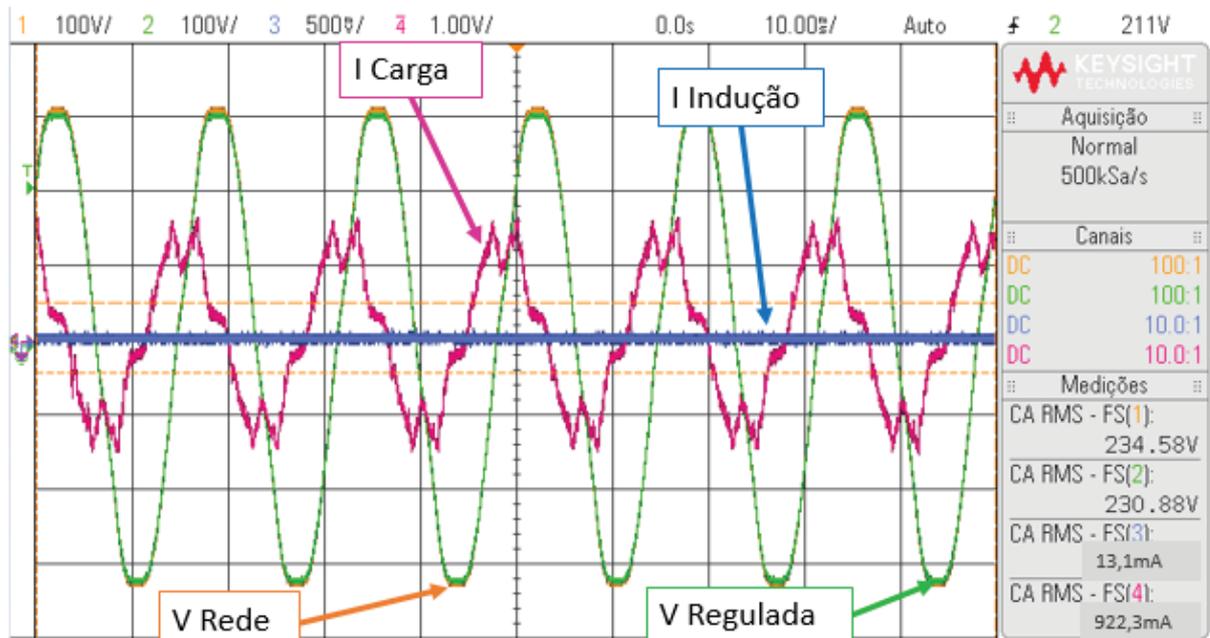


Fonte: Próprio autor

Com carga RC, pode-se verificar através da Figura 52 que a tensão de saída, antes da comutação, apresentou um valor mais elevado que com as cargas testadas anteriormente, como já era esperado, pois a corrente capacitiva provoca uma regulação negativa no autotransformador.

A Figura 54 está apresentado que mesmo com uma tensão de entrada acima de 234V, sendo assim, em níveis críticos, o sistema se mostra eficaz reduzindo a tensão para a casa de 230V na sua saída, ou seja, dentro dos níveis adequados.

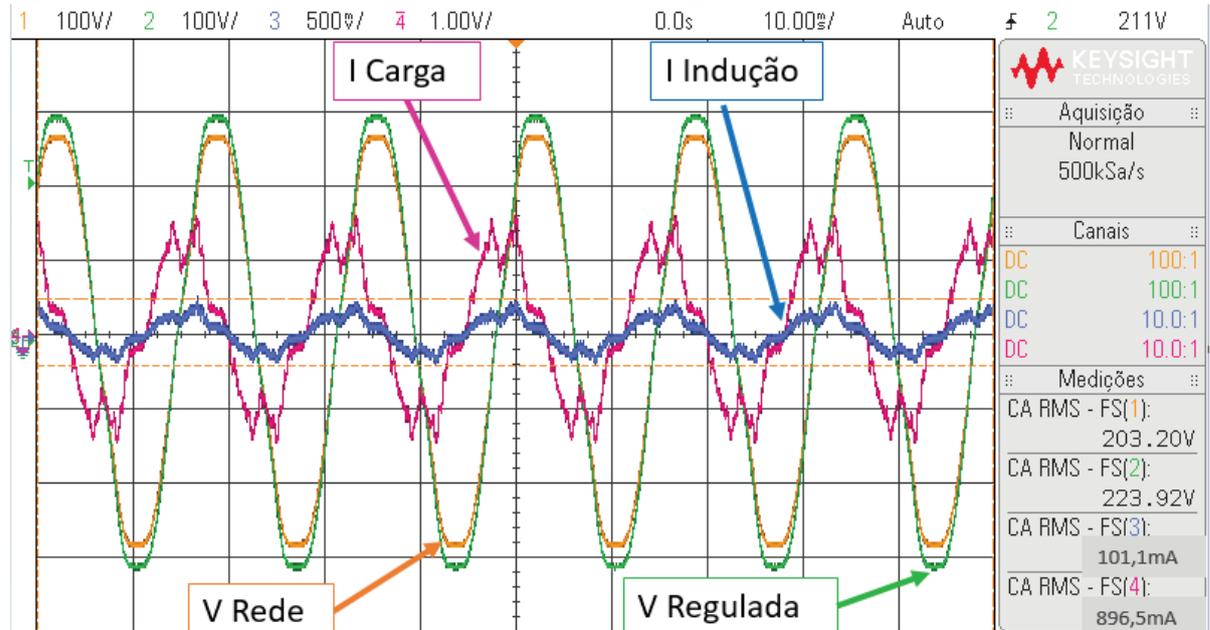
Figura 54: Sobretensão absorvida pelo secundário do autotransformador com carga RC



Fonte: Próprio autor

O próximo teste, foi reduzir a tensão, até acontecer a comutação, para o acréscimo de tensão na carga como pode ser visto na Figura 55.

Figura 55: Ajuste de tensão no autotransformador com carga RC



Fonte: Próprio autor

Assim que o sistema comuta, e o enrolamento primário, começa a induzir tensão no secundário, temos um acréscimo de 20,72V sobre a carga RC.

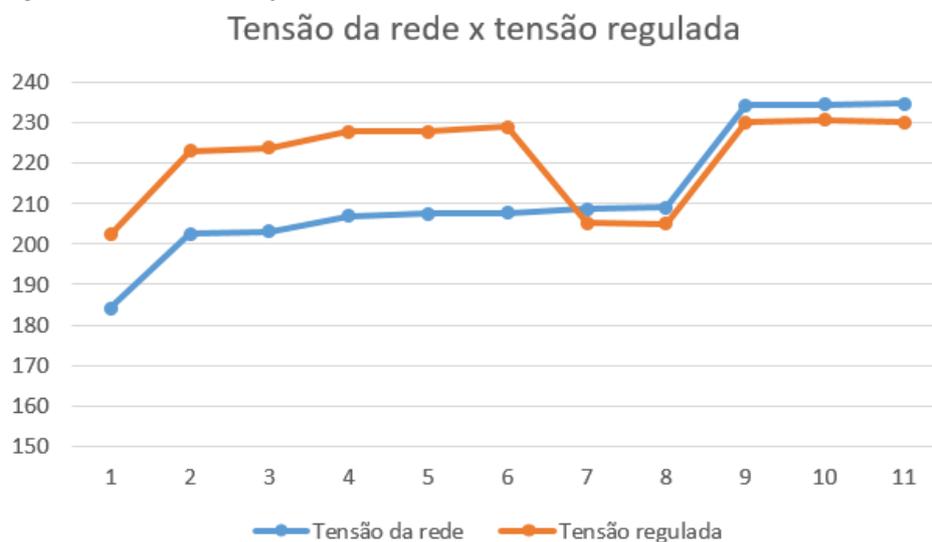
Através do Quadro 3, e da Figura 56, é possível verificar algumas correções de tensão realizadas pelo sistema.

Quadro 3: Ajustes de tensão do sistema

Nº do ensaio	Tensão da rede (V)	Tensão sobre a carga (V)	Ajustes da Tensão (V)
1	184,17	202,3	18,13
2	202,65	223,04	20,39
3	203,2	223,92	20,72
4	207,04	227,86	20,82
5	207,49	227,87	20,38
6	207,72	229,01	21,29
7	208,7	205,23	-3,47
8	209,13	205,12	-4,01
9	234,37	230,31	-4,06
10	234,58	230,88	-3,7
11	234,77	230,22	-4,55

Fonte: Próprio autor

Figura 56: Gráfico de ajustes do sistema



Fonte: Próprio autor

Com base em todos os dados apresentados, fica evidente que o sistema proposto realiza importantes correções de tensão, ou seja, mesmo a rede variando na faixa entre 184V e 234V, o sistema consegue corrigir e fornecer a carga, uma tensão entre 202V e 231V, que é considerada a faixa de tensão adequada no Módulo 8 do PRODIST.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral deste trabalho, foi projetar, dimensionar e desenvolver de maneira experimental e laboratorial, um sistema de regulação de tensão monofásico automático eficaz, de baixo custo, com baixo consumo de energia e com elevada robustez, estes objetivos, foram atingidos em sua plenitude, como pode se ver abaixo:

- Compreender a legislação do setor elétrico Brasileiro, especialmente no que tange aos níveis de tensão entregues aos consumidores;
- Pesquisar sobre os sistemas de regulação de tensão utilizados pelas concessionárias de distribuição do Brasil, equipamentos utilizados e o funcionamento dos mesmos;

Através da Revisão da Literatura, foi possível aprofundar o conhecimento em especial do Módulo 8 do PRODIST, principalmente no que tange a qualidade de energia elétrica, tanto em regime permanente quanto em regime transitório. Da mesma maneira, a revisão trouxe muito conhecimento, nas questões de equipamentos reguladores de tensão dos sistemas de potência.

No quesito prático, os propósitos almejados foram:

- Projetar um autotransformador regulador de tensão monofásico de comutação automática;
- Realizar os ensaios com diversos tipos de cargas, observando o tempo de comutação e a tensão entregue a carga;

Para o desenvolvimento do protótipo, foi necessário unir conhecimentos adquiridos nas disciplinas de Eletrônica, Circuitos Elétricos, Circuitos Digitais, Eletrônica de Potência e Máquinas Elétricas, portanto, uma grande gama de conteúdos teóricos e práticos estudados durante o curso.

O autotransformador, projetado com núcleo toroidal e lâminas de aço silício de GO, garantiu, um baixo consumo de energia elétrica, e um custo de fabricação semelhante ao de núcleo EI, além de não causar interferências no circuito eletrônico, devido a sua baixa dispersão magnética.

Os testes realizados com o equipamento desenvolvido, apresentaram ótimos resultados, realizando comutações eficientes, nas tensões pré-definidas, e conseqüentemente fazendo uma correção de tensão bastante precisa sobre a carga.

O projeto desenvolvido, pode ser utilizado para regulação da tensão em cargas específicas, e também para regulação de tensão de consumidores das concessionárias de energia elétrica, ou seja, instalados no ponto de entrega destes, corrigindo de uma forma

simples, e com baixo custo, a tensão entregue a estes, quando a mesma varia entre 184V e 234V.

### 5.1 DIFICULDADES NA ELABORAÇÃO DO PROJETO

A principal, certamente, foi o pico de corrente de magnetização da bobina primária do autotransformador, no momento da comutação, que acabava por danificar componentes do circuito de potência.

Outras dificuldades ficaram em torno das referências GND, como o sistema possui, dois pequenos transformadores de alimentação, em vários momentos houveram distorções no funcionamento do circuito eletrônico.

### 5.2 SUGESTÕES PARA MELHORIA DO PROJETO

Para o melhoramento do protótipo, uma sugestão é aumentar o número de *taps*, com menores tensões induzidas em cada um deles, tornando possível a correção de tensão, com quedas maiores que a atendida nesse projeto.

## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14724**. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/normalizacao/lista-de-publicacoes/abnt>>. Acesso em: 10 out. 2017.

ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores De Energia. **Privatizações**. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/privatizacoes>>. Acesso em: 07 out. 2017.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (Org.). **Características Gerais** Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par1\\_cap1.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap1.pdf)>. Acesso em: 07 out. 2017.

\_\_\_\_\_. **PRODIST: Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica - Revisão 8**, 01 jan. 2017

\_\_\_\_\_. **Resolução nº. 414: Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de 9 de setembro de 2010**

AZEVEDO, Fernando Araújo de. **Otimização de rede de distribuição de energia elétrica subterrânea reticulada através de algoritmos genéticos**. 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

AZEVEDO, Rodrigo Motta de. **Apostila de Transformadores II**. 2011. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAe5P0AI/apostila-transformadores-ii>>. Acesso em: 15 out. 2017.

BURATTI, Rafael Pereira. **Reguladores de tensão em redes elétricas com alta penetração de cargas não lineares**. 2016. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2016.

CEMIG (Minas Gerais). **História da Eletricidade no Brasil**. Disponível em: <[http://novo.more.ufsc.br/homepage/inserir\\_homepage](http://novo.more.ufsc.br/homepage/inserir_homepage)>. Acesso em: 07 out. 2017.

CLAMPER. **O que é DPS? Conheça os Dispositivos de Proteção contra Surtos e como eles protegem seus equipamentos contra queimas causadas por raios**. Disponível em: <<http://www.clamper.com.br/pt/2016/12/16/o-que-e-dps-dispositivos-de-protacao-contrasurtos-eletricos/>>. Acesso em: 25 out. 2017.

ELEKTRO (São Paulo). **Energia ativa e reativa**. Disponível em: <<https://www.elektro.com.br/seu-negocio/energia-ativa-e-reativa>>. Acesso em: 20 out. 2017.

FELÍCIO, Jordana Rodrigues. **Modelagem de reguladores de tensão monofásicos com 32 degraus para estudos em regime permanente e transitório**. 2006. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica Pós Graduação em Energia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

FRAGOAS, Alexandre Gracioli. **Estudo de caso do uso de banco de capacitores em uma rede de distribuição primária**. 2008. 63 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

KOEHLER, Romeu Valdir Birck. **Comutador automático de relação de transformação em média tensão aplicado à transformadores monofásicos de distribuição de energia elétrica**. 2016. 82 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora, 2005. 778 p.

MARTIGNONI, Alfonso. **TRANSFORMADORES**. 8. ed. São Paulo: Globo, 1991. 307 p.

MATTOS, Marcos M. de et al. **Análise comparativa de perdas em transformadores de distribuição de núcleo empilhado e enrolado**. 2010. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/44668731/Avaliacao-comparativa-das-perdas-em-transformadores-de-distribuicao-de-nucleo-empilhado-e-nucleo-enrolado>>. Acesso em: 24 out. 2017.

PENZ, Rodrigo Siqueira. **Apostila Autotransformador**. Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia e Arquitetura Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014/2.

PENZ, Rodrigo Siqueira. **Apostila Circuitos Magnéticos**. Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia e Arquitetura Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014/2.

RESENER, Mariana. **Alocação e ajuste ótimo de reguladores de tensão em sistemas de distribuição**. 2008. 83 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ROCHA, Michel. **Regulador Monofásico de Baixa Tensão para Atendimento de Unidades Consumidoras**. 2013. 89 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2013.

SANTOS, Beatriz Mesquita dos. **Reguladores de tensão em transformadores de distribuição**. 2015. 55 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015.

SILVA, Márcio Severino da. **Análise de desempenho de redes de distribuição monofilares com retorno pela terra (MRT) frente a descargas atmosféricas**. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia e Geociências Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SIMONE, Gilio Aluísio. **Transformadores – Teoria e Exercícios**. Ed. Érica, São Paulo, 1998.

SMS. **Sags, swells e flickers**. Disponível em: <<http://www.sms.com.br/respostas-sms/sobre-energia/disturbios-energia/sags-swells-flickers/sags-swells-flickers.asp>>. Acesso em: 07 out. 2017.

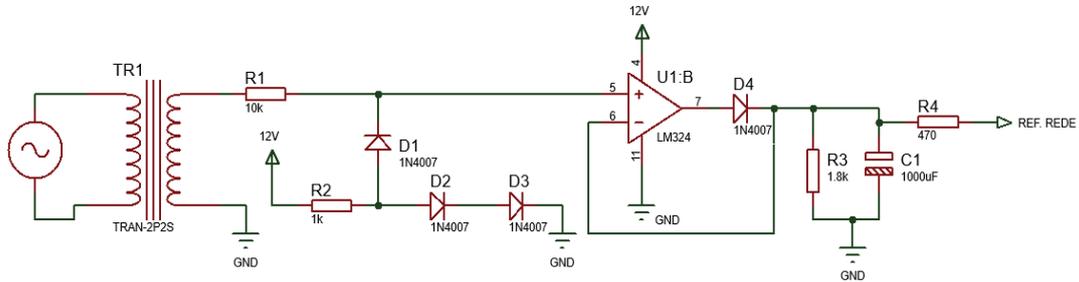
SOMA BRASIL (Ribeirão Pires). **Perda magnética**. Disponível em: <<http://www.somabrasil.com.br/qualidade>>. Acesso em: 27 out. 2017.

TOROID (São José dos Pinhais). **Vantagens do transformador toroidal**. Disponível em: <<http://www.toroid.com.br/site/vantagens/>>. Acesso em: 28 out. 2017.

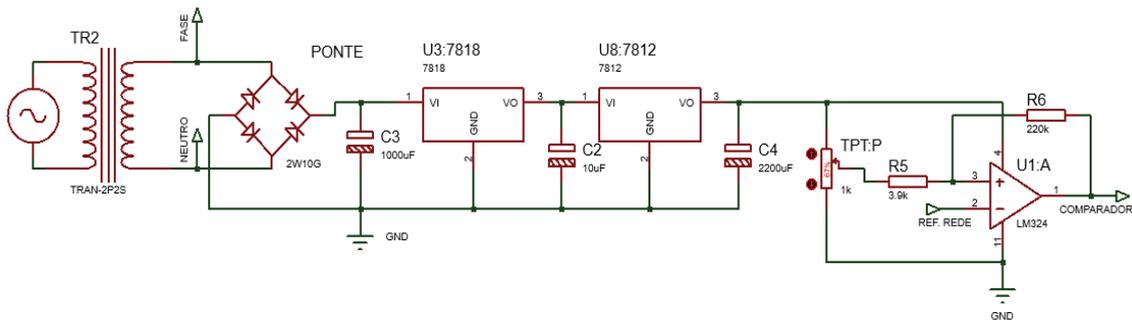
**ANEXO A**  
**PROJETO DO CIRCUITO ELETRÔNICO DESENVOLVIDO**

## Circuito eletrônico em etapas

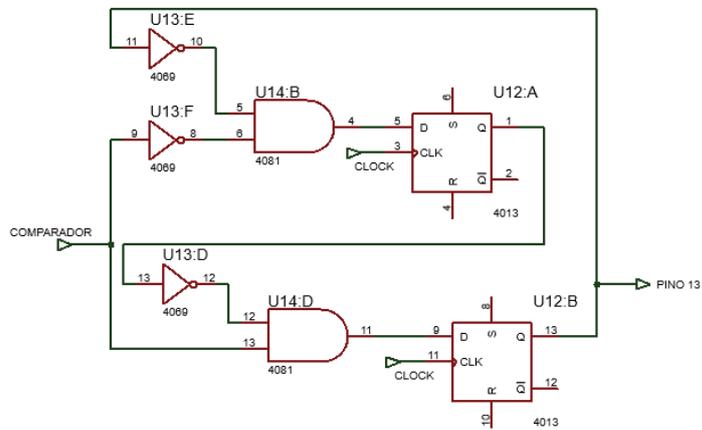
### Circuito condicionador da tensão de referência



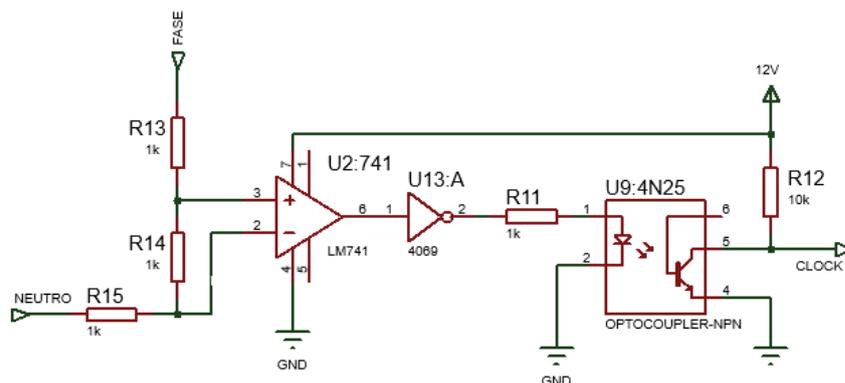
### Circuito de alimentação e circuito comparador com histerese



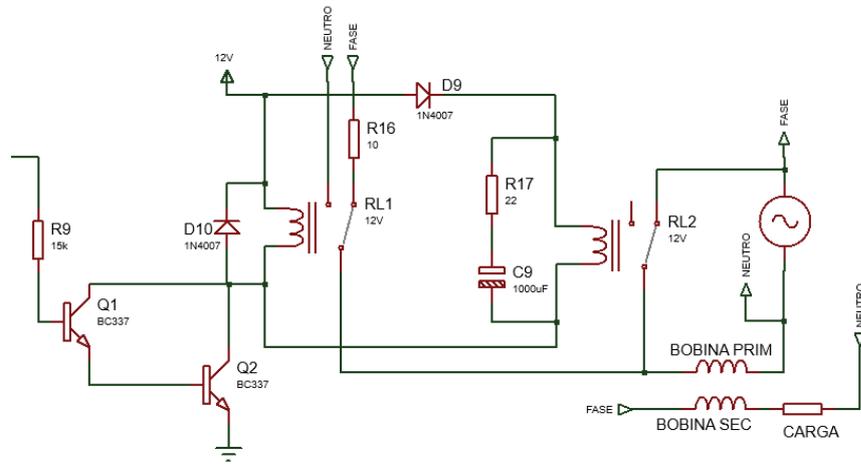
### Circuito lógico



### Cicuito de clock



## Circuito de potência



**ANEXO B**  
**FOTOS DO PROTÓTIPO**

Foto 1: Protótipo e cargas

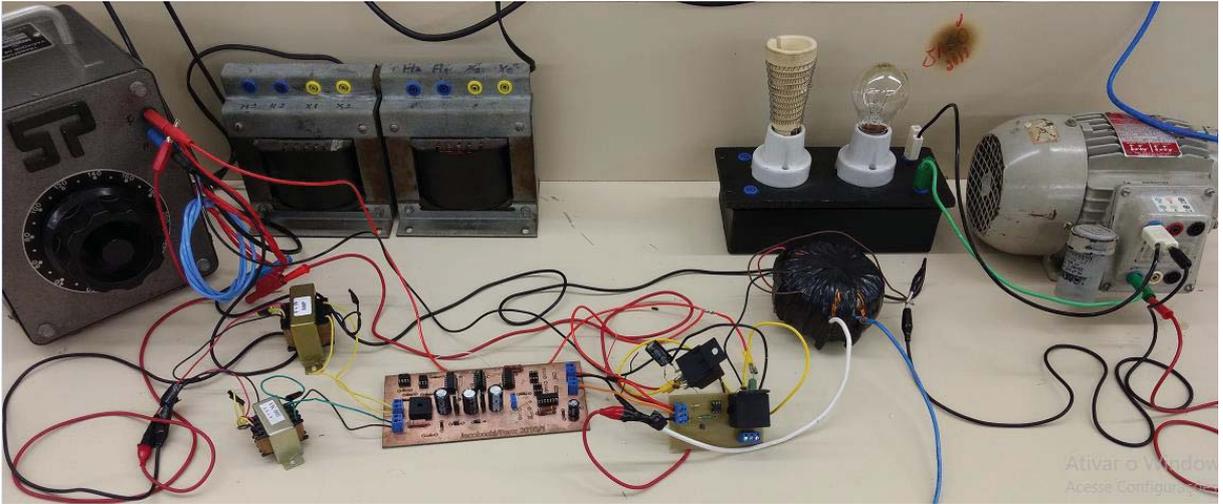


Foto 2: Protótipo

