

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PEDRO HENRIQUE MOURA ROSOLEN**

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA FONTE DE TENSÃO  
CONTROLADA PARA SIMULAÇÃO DE DEFEITOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2018**

PEDRO HENRIQUE MOURA ROSOLEN

## **PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA FONTE DE TENSÃO CONTROLADA PARA SIMULAÇÃO DE DEFEITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Me. Jonatas Policarpo Américo

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luis Roel Ortiz

PATO BRANCO

2018

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA FONTE DE TENSÃO CONTROLADA PARA SIMULAÇÃO DE DEFEITOS**”, do(s) aluno(s) “**Pedro Henrique Moura Rosolen** foi considerado **Aprovado** de acordo com a ata da banca examinadora N° 206 de 2018.

Fizeram parte da banca os professores:

**Professor Mestre Jonatas Policarpo Américo**

**Professor Doutor Kleiton de Moraes Souza**

**Professor Mestre Cesar Augusto Portolann**

**Professor Doutor Jorge Luis Roel Ortiz**

**A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica**

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Marcos Alberto Rosolen e Janete de Moura Rosolen, por me auxiliarem na construção de minha carreira. E à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que é responsável pela formação sólida de muitos profissionais atuantes no mercado de trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me guiar nos objetivos de minha vida e me manter sempre determinador a contribuir para o desenvolvimento da humanidade.

Aos meus orientadores, Professor Mestre Jonatas Policarpo Américo e Professor Doutor Jorge Luis Roel Ortiz, que confiaram a mim este trabalho e me deram suporte em tudo que precisei.

Ao Professor Mestre Cleidimar Nardi e ao Professor Doutor Kleiton de Moraes Sousa por fornecer informações imprescindíveis para realização desta monografia.

Ao técnico laboratorista Célio Degaraes, que forneceu conselhos úteis na confecção e montagem das placas eletrônicas deste trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por fornecer laboratórios e equipamentos de qualidade para a realização dos ensaios práticos.

À minha família por serem meu fundamento, minha rocha forte e minha motivação. E pôr fim aos meus amigos da universidade, que apoiaram em momentos de dificuldades e pelas suas opiniões relevantes que me fizeram corrigir problemas pelos quais passei.

## EPÍGRAFE

*Unless we change our way of thinking, we will not be able to solve the problems caused by the way we get used to seeing the world. (EINSTEIN, Albert).*

A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo. (EINSTEIN, Albert).

## RESUMO

ROSOLEN, Pedro H. M. Compartilhamento da informação e do conhecimento em bibliotecas especializadas. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Os sistemas elétricos de potência atuais estão em frequente expansão devido ao aumento no consumo energia elétrica. Nestes sistemas, há possibilidade de falhas em equipamentos elétricos que acarretam em distúrbios de tensão em partes do conjunto. Essas falhas podem causar danos a equipamentos tanto dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, quanto de consumidores finais. Em contadores elétricos, reduções severas na amplitude, longos períodos de duração ou ângulos críticos de começo do afundamento podem provocar desligamento do dispositivo. Motores de indução podem ser retirados de funcionamento se houverem faltas com duração e amplitude superiores aos limites operacionais. Os reatores de lâmpadas de descarga, durante eventos de afundamento, apresentam picos de corrente que aumentam proporcionalmente com a redução da tensão de alimentação. O transformador é o equipamento mais suscetíveis a esses tipos de falha. Sendo estes os dispositivos mais importantes utilizados em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Apresentam um impacto significativo nas perdas em serviços públicos. Embora os transformadores tenham um longo ciclo de vida, o aumento do consumo industrial resulta em condições operacionais mais severas, incluindo situações de falha com redução de sua eficiência. Desta forma, implicando em mais custos de manutenção e redução do seu ciclo de vida. Neste trabalho, foi proposta a utilização de uma topologia de fonte controlada de tensão para realizar afundamentos de 127 V no primário de um transformador monofásico 127/220 V com 250 W de potência. Foram montados dois protótipos de teste, em que foram realizadas alterações necessárias para a correta operação da fonte. Foram feitos 6 testes com diferentes durações, nos quais foi observado o correto funcionamento da fonte.

**Palavras-chave:** Transformadores. Contadores. Motores de indução. Reatores. Afundamentos de tensão.

## ABSTRACT

ROSOLEN, Pedro H. M. Sharing of information and knowledge in specialized libraries. 2018. Course Completion Work - Electrical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2018.

Current power systems are undergoing frequent expansion due to increased consumption of electric power. In these systems, there is a possibility of failures in electrical equipment that lead to voltage disturbances in parts of the assembly. These failures can cause damage to equipment of both the generation, transmission and distribution systems of electric energy, as well as of end consumers. In electrical contactors, severe reductions in amplitude, long periods of life, or critical angles of beginning of sinking may cause the device to shut down. Induction motors can be taken out of service if faults with a duration and amplitude exceeding the operating limits are present. Discharge lamp reactors, during sinking events, exhibit current peaks that increase proportionally with the reduction of the supply voltage. The transformer is the most susceptible equipment to these types of failure. These being the most important devices used in transmission and distribution systems of electric energy. They have a significant impact on losses in public services. Although transformers have a long-life cycle, increased industrial consumption results in more severe operating conditions, including failure situations with reduced efficiency. In this way, implying more maintenance costs and reduction of its life cycle. In this work, it was proposed the use of a controlled voltage source topology to perform 127 V sags in the primary of a 127/220 V single phase transformer with 250 W of power. Two test prototypes were assembled, in which changes were made necessary for the correct operation of the source. There were 6 tests with different durations, in which the correct functioning of the source was observed.

**Keywords:** Transformers. Contactors. Induction motors. Reactors. Voltage sags.



## LISTAS FIGURAS

FIGURA 1. MAGNITUDE DA TENSÃO NAS TRÊS FASES DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.....	21
FIGURA 2. MAGNITUDE DA TENSÃO NAS TRÊS FASES DO MOTOR.....	21
FIGURA 3. MAGNITUDE DA TENSÃO NAS TRÊS FASES DO TRANSFORMADOR.....	22
FIGURA 4. ILUSTRAÇÃO DO DIAGRAMA UNIFILAR DO EXEMPLO.....	24
FIGURA 5. TENSÃO NA BARRA DE 480 V, COM FALTA MONOFÁSICA.....	25
FIGURA 6. CORRENTE DE ARMADURA DO MOTOR DURANTE A FALTA.....	25
FIGURA 7. TENSÃO DA FASE AFETADA NA ENTRADA DO MOTOR, NO RELÉ.....	26
FIGURA 8. PLANTA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO ANALISADO.....	26
FIGURA 9. TENSÃO NO TRANSFORMADOR DE 25 MVA (LADO DE ALTA).....	27
FIGURA 10. TENSÃO E CORRENTE NO CONTATOR COM AFUNDAMENTO DE 80%.....	28
FIGURA 11. NÚMERO DE EVENTOS DE AFUNDAMENTO POR ANO.....	30
FIGURA 12. CORRENTE DURANTE UM AFUNDAMENTO DE 10% DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO.....	32
FIGURA 13. CORRENTE DURANTE UM AFUNDAMENTO DE 30% DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO.....	32
FIGURA 14. DIAGRAMA TÍPICO DE UM STATCOM.....	34
FIGURA 15. TOPOLOGIA BÁSICA DE UM DVR.....	36
FIGURA 16. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UMA ESTRUTURA TÍPICA DE DVR.....	37
FIGURA 17. DIAGRAMA DE BLOCOS TÍPICO PARA CONTROLE DE UM DVR.....	37
FIGURA 18. DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SST COM ACOPLAMENTO CC.....	38
FIGURA 19. DIAGRAMA DA FONTE PROPOSTA.....	41
FIGURA 20. DIAGRAMA DO MÓDULO DE CONTROLE DE DURAÇÃO DO AFUNDAMENTO.....	42
FIGURA 21. DIAGRAMA DO MÓDULO DE CONTROLE DE COMUTAÇÃO DOS SINAIS.....	44
FIGURA 22. DIAGRAMA DO AUTOTRANSFORMADOR E DO CIRCUITO DE DRIVER.....	45
FIGURA 23. CIRCUITO AMOSTRADOR DE TENSÃO.....	46
FIGURA 24. SINAL DE SAÍDA DO COMPARADOR.....	47
FIGURA 25. PULSOS DE CONTROLE DE DURAÇÃO DO SINAL GERADO PELA FONTE.....	47
FIGURA 26. PULSO DE ENTRADA E PULSO EXPONENCIAL GERADO PELO FILTRO PASSIVO.....	48
FIGURA 27. PULSO DE ENTRADA DO TEMPORIZADOR E PULSO DE SAÍDA COMUTADO.....	49
FIGURA 28. PULSO DE ENTRADA DO TEMPORIZADOR E PULSO DE SAÍDA COMUTADO.....	50
FIGURA 29. SINAL SIMULADO DE SAÍDA DO GERADOR DE DEFEITOS.....	50
FIGURA 30. FOTO DO CONJUNTO INICIAL DE TESTES.....	53
FIGURA 31. FOTO DA PLACA DEFINITIVA IMPLEMENTADA.....	54
FIGURA 32. ISOLAÇÃO ELÉTRICA DA PLACA DEFINITIVA.....	55
FIGURA 33. DIAGRAMA DO NOVO CIRCUITO DE CONTROLE DE CHAVEAMENTO.....	56
FIGURA 34. MAPEAMENTO DAS CHAVES SELETORAS.....	56
FIGURA 35. DIAGRAMA DA CHAVE SELETORA DE 10 CANAIS.....	57
FIGURA 36. TENSÃO OBTIDA NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR E SINAIS DE CONTROLE DOS RELÉS.....	59
FIGURA 37. TENSÕES NA CARGA, NO CONTROLE NOMINAL E DE AFUNDAMENTO DURANTE O ENSAIO 1.....	61
FIGURA 38. TENSÕES NA CARGA, NO CONTROLE NOMINAL E DE AFUNDAMENTO DURANTE O ENSAIO 2.....	61
FIGURA 39. AMPLIAÇÃO DA REGIÃO DE AFUNDAMENTO DO ENSAIO 2.....	62
FIGURA 40. TENSÕES NA CARGA, NO CONTROLE NOMINAL E DE AFUNDAMENTO DURANTE O ENSAIO 3.....	63
FIGURA 41. TENSÕES NA CARGA, NO CONTROLE NOMINAL E DE AFUNDAMENTO DURANTE O ENSAIO 4.....	64
FIGURA 42. AMPLIAÇÃO DA REGIÃO DE AFUNDAMENTO DO ENSAIO 4.....	64
FIGURA 43. TENSÕES NA CARGA, NO CONTROLE NOMINAL E DE AFUNDAMENTO DURANTE O ENSAIO 5.....	65
FIGURA 44. AMPLIAÇÃO DA REGIÃO DE AFUNDAMENTO DO ENSAIO 5.....	65
FIGURA 45. TENSÕES NA CARGA, NO CONTROLE NOMINAL E DE AFUNDAMENTO DURANTE O ENSAIO 6.....	66
FIGURA 46. AMPLIAÇÃO DA REGIÃO DE AFUNDAMENTO DO ENSAIO 6.....	67

## LISTAS TABELAS

TABELA 1 – Tipos de distúrbios de tensão de curta duração.....	19
TABELA 2 – Testes de afundamentos de tensão de curta duração.....	60

## LISTAS DE SIGLAS

3PF	<i>3-Phase Fault</i> – Falta Trifásica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
CLP	Controlador Lógico Programável
CPD	<i>Current Pump Device</i> – Dispositivo Bombeador de Corrente
DVR	<i>Dynamic Voltage Regulator</i> – Regulador Dinâmico de Tensão
FDD	<i>Fault Decoupling Device</i> – Dispositivo de Desacoplamento de Falta
GD	Geração Distribuída
LLF	<i>Line-Line Fault</i> – Falta Bifásica
LLFG	<i>Line-Line Fault to Ground</i> – Falta Bifásica para a Terra
PAR	<i>Phase Angle Regulator</i> – Regulador de Ângulo de Fase
PCC	<i>Point of Common Coupling</i> – Ponto de Acoplamento Comum
PCI	Placa de Circuito Impresso
PI	Proporcional e Integral
PLL	<i>Phase Locke Loop</i> – Ângulo de Malha Fechada
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> – Modulação de Largura de Pulso
SLGF	<i>Single Line to Ground Fault</i> – Falta Monofásica
SSSC	<i>Static Synchronous Series Compensation</i> - Compensação Estática Síncrona em Série
SST	<i>Solid State Transformer</i> – Transformador de Estado Sólido
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensation</i> – Compensação Estática Síncrona
VTDC	Variações de Tensão de Curta Duração

## LISTAS DE SÍMBOLOS

°	Graus
%	Percentual
A	Ampère
GND	<i>Ground</i> - Terra
GVA	Giga Volt Ampère
Hz	Hertz
kV	Quilovolts
LC	Indutivo-capacitivo
MVA	Mega Volt-Ampère
p.u.	Por unidade
RC	Resistivo-capacitivo
s	Segundos
V	Volts
W	Watt

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2</b>	<b>VARIAÇÕES DE TENSÃO .....</b>	<b>18</b>
2.1	DEFINIÇÃO.....	18
2.1.1	Caracterização dos distúrbios de tensão de curta duração .....	18
2.2	CARACTERIZAÇÃO DE TIPOS DE AFUNDAMENTOS.....	20
2.2.1	Afundamentos de tensão causados por faltas em sistemas de distribuição .....	20
2.2.2	Afundamentos de tensão causados por partidas de motores a indução .....	21
2.2.3	Afundamentos de tensão causados por energização de transformadores.....	22
2.3	PROBLEMAS CAUSADOS POR AFUNDAMENTOS DE TENSÃO .....	23
2.3.1	Problemas em máquinas a indução.....	23
2.3.2	Problemas em contadores elétricos.....	27
2.3.3	Problemas em transformadores.....	29
2.3.4	Problemas em lâmpadas de descarga .....	31
2.4	POSSÍVEIS SOLUÇÕES PARA DISTURBIOS DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO .....	33
2.4.1	Compensadores estáticos de tensão .....	34
2.4.2	Compensadores dinâmicos de tensão .....	35
2.4.3	Outras formas de compensação de tensão .....	38
<b>3</b>	<b>FONTE GERADORA DE DISTÚRBIOS DE TENSÃO.....</b>	<b>41</b>
3.1	TOPOLOGIA PROPOSTA .....	41
3.1.1	Circuito de controle de duração .....	42
3.1.2	Circuito de comutação do sinal .....	43
3.1.3	Autotransformador.....	44
3.1.4	Driver .....	45
3.2	SIMULAÇÕES .....	45
3.2.1	Circuito de controle de duração .....	46
3.2.2	Circuito de comutação do sinal .....	48
3.2.2	Pulsos de controle e saída do gerador de faltas .....	49
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTOS PRÁTICOS .....</b>	<b>51</b>
4.1	ELABORAÇÃO DO LAY-OUT DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO.....	51
4.1.1	Conjunto inicial de testes .....	51
4.1.1.1	Circuito de controle de duração .....	51
4.1.1.2	Circuito de comutação de sinais .....	52
4.1.2	Conjunto final de testes .....	53
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>58</b>
5.1	ENSAIO INICIAL.....	58
5.2	ENSAIOS FINAIS .....	59
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE A – OPERAÇÃO DA FONTE CONTROLADA .....</b>	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE B – DIAGRAMA ELÉTRICO COMPLETO.....</b>	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE C – DIAGRAMA ELÉTRICO MÓDULO DE CONTROLE DE DURAÇÃO .....</b>	<b>77</b>

<b>APÊNDICE D – DIAGRAMA ELÉTRICO MÓDULO DE COMUTAÇÃO DE SINAIS.....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE E – PLACA DE CONTROLE DE DURAÇÃO .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE F – PLACA DE COMUTAÇÃO DE SINAIS .....</b>	<b>80</b>
<b>APÊNDICE G – COMPONENTES PLACA FINAL.....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE H – TRILHAS DA FACE SUPERIOR DA PLACA FINAL .....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE I – TRILHAS DA FACE INFERIOR DA PLACA FINAL .....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de potência atuais estão em frequente expansão devido ao aumento no consumo de energia elétrica. Nestes sistemas, há possibilidade de falhas que acarretam em quedas de tensão elétrica em partes do conjunto. Essas faltas ou falhas podem causar danos a equipamentos tanto dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia como a consumidores finais. Para evitar prejuízos com comportamentos inesperados, torna-se cada vez mais necessário a realização de testes para aprimorar a confiabilidade e segurança dos dispositivos de acionamento, comutação e de proteção do sistema elétrico de potência. Tais comportamentos podem variar de simples oscilações até picos elevados de tensão, também podem ocorrer deformações de onda devido à saturação magnética ou elétrica dos componentes (MA & KARADY, 2008).

Entre os equipamentos sensíveis a variações, pode-se destacar transformadores, contadores elétricos, reatores de lâmpadas eletrônicas, máquinas de indução, entre outros. Contadores elétricos podem apresentar desligamentos inesperados quando submetidos a afundamentos de tensão com diferentes ângulos de partida, grandes reduções de amplitude e tempos de exposição muito prolongados (COLLINS & ZAPARDIEL, 1997). Já em máquinas de indução, uma exposição a afundamentos por longos períodos de tempo pode resultar, em casos extremos, no desligamento da máquina (LEIRIA, et. al., 2006). Os reatores de lâmpadas de descarga podem sofrer com elevados picos de corrente que provocam alterações nos parâmetros de operação das lâmpadas e redução de vida útil (SILVA, et. al., 2013). No caso de transformadores, grandes eventos de afundamento de tensão podem provocar saturação do núcleo de ferro, o conseqüente aquecimento do dispositivo, deformações de onda além de surtos de tensão e corrente no secundário do equipamento (ALDABÓ, 2001).

Neste contexto, foi pensado no desenvolvimento de um gerador de defeitos que pudesse simular afundamentos de tensão de forma a controlar a amplitude e a duração do evento. Este equipamento será composto por um circuito de controle temporal, em que poderá ser escolhido a duração do afundamento e dos sinais pré e pós nominal. Haverá uma etapa de comutação dos sinais enviados pela fonte, na qual os pulsos de controle serão enviados para duas chaves de potência

responsáveis pela troca de sinais nominal e de afundamento. A amplitude da tensão nominal será gerada por um transformador monofásico 127/220 V, enquanto o afundamento será adquirido da rede de 127V. Também serão abordadas e detalhadas as estruturas constituintes da fonte de tensão controlada, bem como os resultados de simulações e dos testes obtidos em laboratório.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é projetar e implementar uma fonte controlada de tensão para simular sinais defeituosos em transformadores. Como objetivos específicos tem-se:

- Revisar a teoria do afundamento de tensão, com base na problematização relacionada a motores, transformadores e contadores;
- Projetar o circuito da fonte de afundamento;
- Realizar testes com a topologia proposta;
- Projetar as placas de circuito impresso;
- Testar sinais gerados pela fonte.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho será dividido em 6 capítulos: Introdução, Problemas com distúrbios de tensão, Fonte Geradora de defeitos, Procedimentos práticos, Resultados e Discussões, além da Conclusões.

No Capítulo 1, é realizado um explanatório acerca dos motivos pelo qual são estudadas as perturbações de tensão. Os defeitos estudados no Capítulo 2 são citados brevemente, bem como aplicações do projeto no estudo dos comportamentos esperados em transformadores monofásicos.

Com relação ao Capítulo 2, será realizado um aprofundamento teórico sobre distúrbios de curta duração e suas principais origens. Serão abordados problemas que afundamentos de tensão causam em máquinas de indução,



contatores elétricos, transformadores e reatores de lâmpadas de descarga. Por fim, serão apresentados circuitos que podem mitigar esses distúrbios de curta duração.

No Capítulo 3, serão detalhadas todas as partes constituintes do gerador proposto, bem como descrição do funcionamento dos módulos e de ajustes necessários para a correta operação da fonte.

O Capítulo 4 detalhará a placa construída para realização dos testes práticos a serem realizados nesta monografia.

No Capítulo 5 serão apresentados os resultados práticos obtidos com os dois conjuntos de teste. Serão mostrados e comentados todos os dados obtidos, e serão explicados e analisados.

Por último, no Capítulo 6, será feita uma síntese do projeto, com destaque dos principais aspectos positivos e negativos do gerador desenvolvido. Além de sugestões de possíveis melhorias e ensaios a serem adicionados futuramente.

## 2 VARIAÇÕES DE TENSÃO

Neste capítulo será abordada a definição dos principais distúrbios de tensão de curta duração, as principais causas geradoras destes eventos e possíveis soluções para mitigar estes acontecimentos.

### 2.1 DEFINIÇÃO

Variações de tensão de curta duração podem ser divididas pelo tempo de ocorrência. De acordo com PRODIST (2018, pg. 19) “Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos”. Estão normalmente associadas a ações de chaveamento de cargas na rede elétrica, podem ocorrer sem que sejam notadas por pessoas comuns ou profissionais e não há muitas coleções de registros (BOLLEN, 2000). A seguir, serão especificados os tipos de variações de tensão de curta duração.

#### 2.1.1 Caracterização dos distúrbios de tensão de curta duração

Afundamentos de tensão são originados de reduções de amplitudes acompanhadas de trocas de fases e com possível ocorrência de deformações na forma de onda. Geralmente são causadas por faltas no sistema de distribuição de energia ou cargas “pesadas” com correntes elevadas na partida (ALDABÓ, 2001). Caracterizam-se por quedas de amplitude sem a perda total de potência do sistema, podem ser classificadas de acordo com a magnitude e o tempo de ocorrência (COLLINS & ZAPARDIEL, 1997). Para consumidores industriais, em que os equipamentos possuem sensibilidade a distúrbios da rede, afundamentos com 10% de redução na amplitude podem provocar um grande prejuízo econômico em componentes, com possibilidade de causar danos severos, além de provocar muitas horas de inatividade.

De acordo com Gomez, et. al. (2001), o afundamento de tensão é um problema bastante comum e provavelmente o mais importante em termos de qualidade de energia. Durante a ocorrência deste problema, a amplitude pode cair entre 0,1 e 0,9 por unidade (p.u) e a duração pode se estender de meio ciclo a três minutos, geralmente acompanhada por mudança de fase. Após o término da falta, o sistema retorna as condições normais de operação. Na Tabela 1 são mostrados todos os tipos de distúrbios de tensão de curta duração.

**Tabela 1 – Tipos de distúrbios de tensão 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>
	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u.
Variação Momentânea de Tensão	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, 2008).

Elevações de tensão são variações na amplitude do sinal superiores a 1,1 p.u, cuja duração pode ocorrer em um intervalo de tempo inferior 3 segundos (variações momentâneas) ou entre 3 segundos a 3 minutos (variações temporárias) (ANEEL, 2018). Podem ser provocadas por elevadas impedâncias de conexão do neutro, reduções repentinas em cargas mecânicas e elétricas ou faltas monofásicas em sistemas elétricos trifásicos (BOOLEN, 2000).

Interrupções de tensão são variações na amplitude do sinal inferiores a 0,1 p.u, cuja duração pode ocorrer em um intervalo de tempo inferior (3 segundos

(variações momentâneas) ou entre 3 segundos a 3 minutos (variações temporárias) (ANEEL, 2018). São comuns durante atuação de dispositivos de proteção, como por exemplo em faltas monofásicas nas redes de distribuição, em que galhos de árvores fazem contato com o condutor por breves momentos.

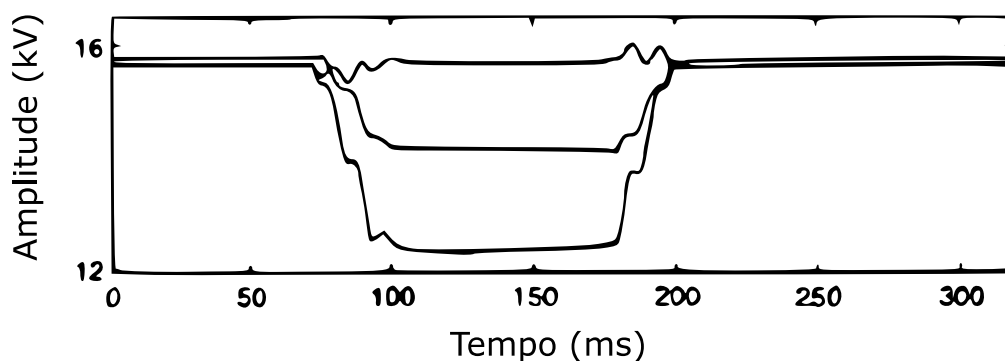
## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DE TIPOS DE AFUNDAMENTOS

Uma das classificações possíveis baseia-se em quatro classes de eventos de afundamento de tensão: de falta induzida, de transformadores, em motores de indução e alteração de nível de tensão em degrau (STYVAKTAKIS, BOLLEN & GU, 2001).

Das classes de eventos mencionadas, as três primeiras são descritas a seguir, conforme Styvaktakis, Bollen, & Gu (2000, pg.1).

### 2.2.1 Afundamentos de tensão causados por faltas em sistemas de distribuição

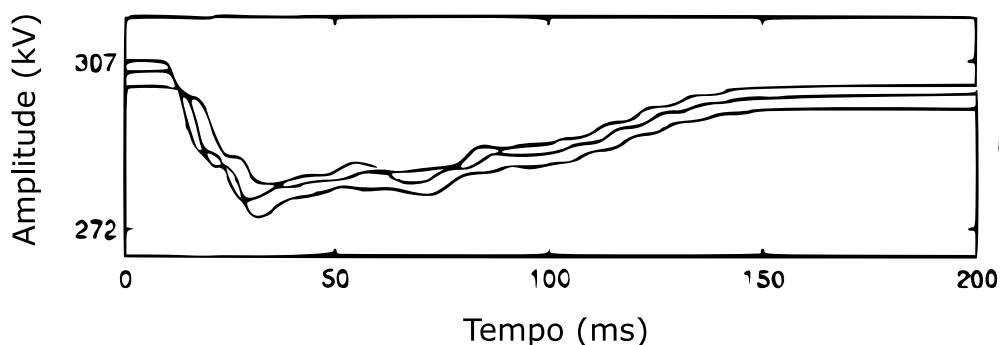
Os eventos de queda de tensão causados por faltas podem ser graves, por isso demandam atenção. Essas faltas causam problemas para muitos consumidores quando se propagam pelo sistema elétrico. A magnitude deste tipo de afundamento em um determinado ponto no sistema depende principalmente do tipo, da distância e da resistência de falta, além da configuração do sistema elétrico. A duração depende do tipo de proteção utilizada e varia de meio ciclo de onda (para um fusível) a poucos segundos (CONRAD, et. al., 1991). Em sistemas trifásicos, podem ocorrer eventos simétricos (faltas trifásicas ou trifásicas para a terra) ou assimétricos (faltas bifásicas, bifásicas e monofásicas para a terra), essas variações determinam se a magnitude do afundamento em cada fase será igual ou não. Na Figura 1, é mostrado um exemplo de afundamento em uma rede de distribuição de 11 kV. O afundamento ocorre em aproximadamente 5 ciclos de onda, valor típico para um circuito de interrupção abrir após receber um comando de um relé. A recuperação da tensão é rápida e quase provoca uma forma retangular na amplitude da tensão na frequência fundamental (STYVAKTAKIS, BOLLEN & GU, 2000).



**Figura 1. Magnitude da tensão nas três fases do sistema de distribuição.**  
**Fonte: Adaptado de Styvaktakis & Bollen & Gu (2000).**

### 2.2.2 Afundamentos de tensão causados por partidas de motores a indução

Durante a partida direta, um motor drena aproximadamente cinco vezes a corrente a plena carga de regime permanente a um baixo fator de potência. Este pico de corrente causa afundamentos de tensão suaves. A magnitude da queda depende das características do motor, bem como da força do sistema de distribuição no ponto de conexão do equipamento (STYVAKTAKIS & BOLLEN & GU, 2000). Na Figura 2 são mostradas as formas de tensão durante afundamento de tensão provocado por uma partida de um motor a indução. Durante o evento, a tensão cai aproximadamente 10% da nominal com recuperação gradual da tensão.



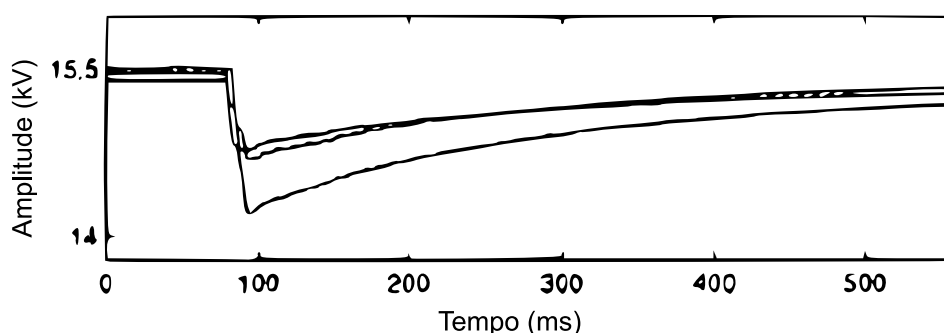
**Figura 2. Magnitude da tensão nas três fases do motor.**  
**Fonte: Adaptado de Styvaktakis & Bollen & Gu (2000).**

### 2.2.3 Afundamentos de tensão causados por energização de transformadores

Há muitos estudos com relação aos afundamentos de tensão neste equipamento, contudo, a maioria não aborda nem a frequência e nem as características deste evento nos sistemas elétricos de distribuição (SMITH, RAN & LEYMAN, 1999). Em transformadores, a principal causa de afundamentos está relacionada aos efeitos provocados pela corrente magnetizante em relés de proteção dos próprios transformadores (HOROWITZ & PHADKE, 1992).

Uma determinada quantidade de fluxo magnético, para cada ponto da forma de onda de tensão, permanece no núcleo de transformadores operando sob regime permanente. Quando o transformador é energizado, o valor do fluxo magnético inicial pode não ser o mesmo do valor em regime permanente em um determinado ponto da onda de tensão. Um transiente irá ocorrer de forma a alterar esse valor para o esperado em regime permanente. Geralmente, isto irá causar uma saturação do fluxo por um ciclo de onda até que a média por ciclo do fluxo tenha caído para um valor próximo a zero. Esta saturação no núcleo ferromagnético do transformador irá provocar picos de corrente magnetizante. A este fenômeno, dá-se o nome de corrente magnetizante de energização ou *magnetizing inrush current* em inglês (Smith, Ran & Leyman, 1999).

A seguir, na Figura 3, tem-se a tensão de saída de um transformador durante o evento de magnetização (energização). O transformador está conectado a uma rede elétrica de 11 kV. A amplitude da tensão em frequência fundamental decaí por um curto período e se recupera gradualmente a medida que a corrente de magnetização decai. A maior queda é de aproximadamente 8% da tensão anterior ao evento.



**Figura 3. Magnitude da tensão nas três fases do transformador.**  
Fonte: Adaptado de Styvaktakis & Bollen & Gu (2000).

## 2.3 PROBLEMAS CAUSADOS POR AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Neste subcapítulo, são abordados problemas causados por afundamentos de tensão em alguns equipamentos sensíveis a essas variações.

### 2.3.1 Problemas em máquinas a indução

Em máquinas a indução, há necessidade de estudar seu comportamento durante faltas de tensão, desequilíbrio de fases, interrupções curtas, picos de tensões, subtensões e sobretensões. Ocorrências significativas como distorções do sinal e variação brusca de amplitude são causas de muitos problemas de qualidade de energia (TANG, et al., 1994).

Com a redução da alimentação do motor, a velocidade angular mecânica no eixo reduz. Dependendo do tamanho do afundamento, a máquina deve retornar à velocidade nominal de rotação à medida que a tensão se recupera. Se a magnitude ou a duração do afundamento exceder os limites operacionais, o motor pode parar e ser retirado pela proteção de rotor bloqueado (LEIRIA, et. al., 2006).

A seguir, na Figura 4, é mostrado um exemplo de circuito em que há um motor a indução acionado por um *driver* de velocidade e alimentado com 480 V por uma rede de distribuição de 24 kV. A rede de distribuição é alimentada por uma rede de transmissão de 100 kV. Este sistema possui uma alimentação de reserva sincronizada com a alimentação normal para casos de falta de energia. O *driver* é alimentado por duas chaves de estado sólido que isolam a carga do circuito de distribuição e têm função de trocar as fontes de alimentação em caso de falhas na rede principal.

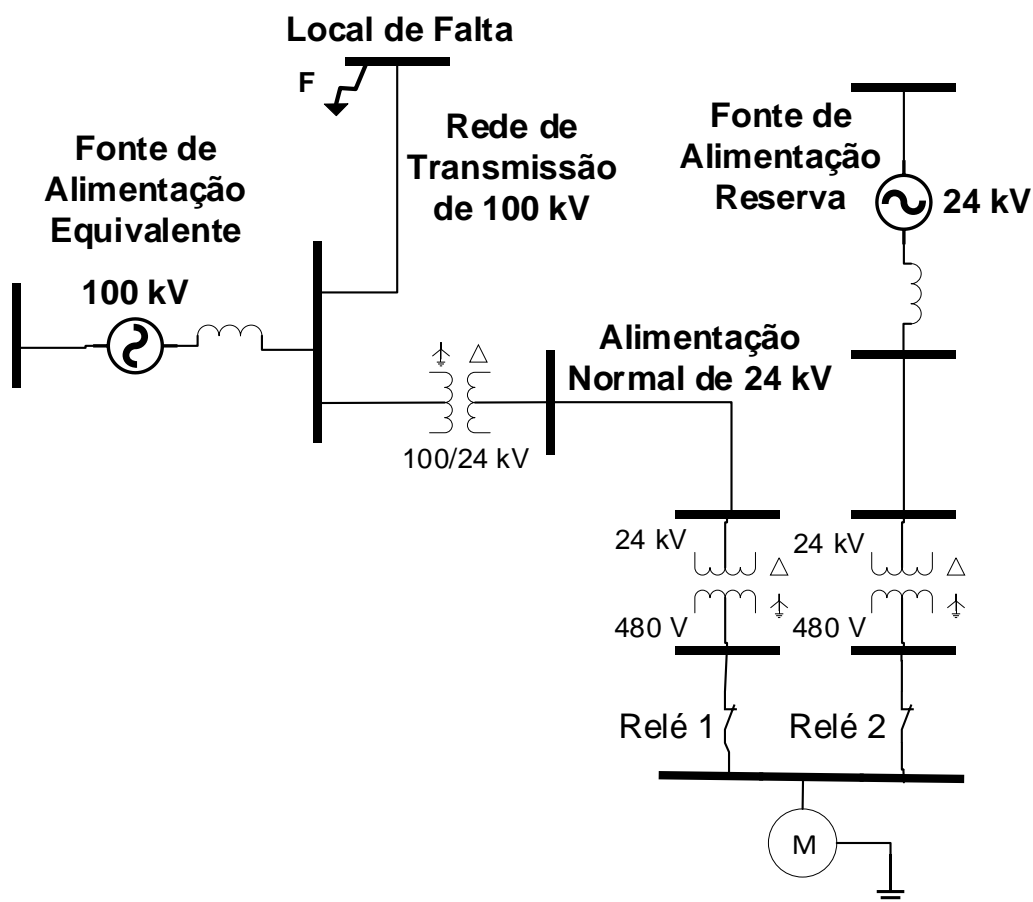
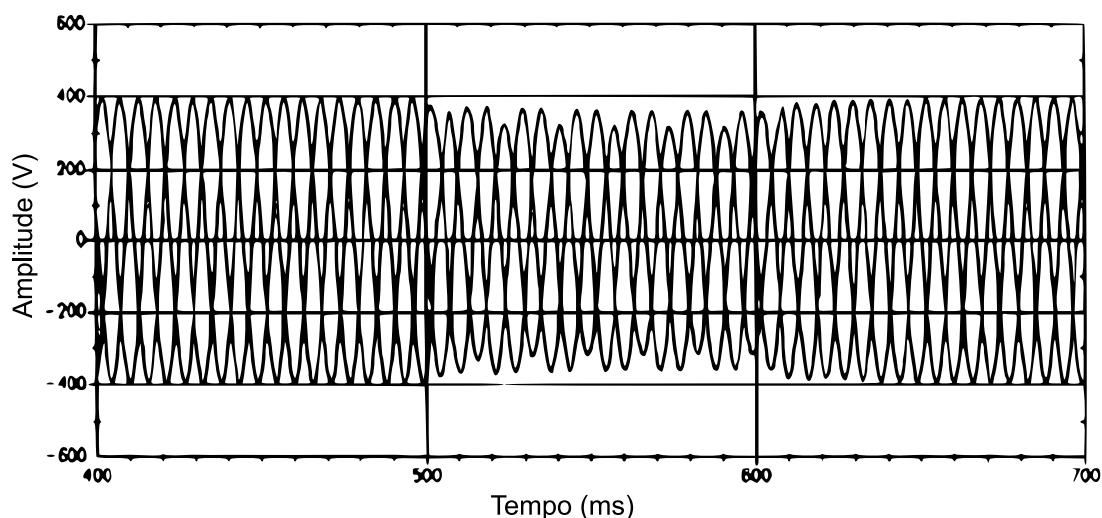


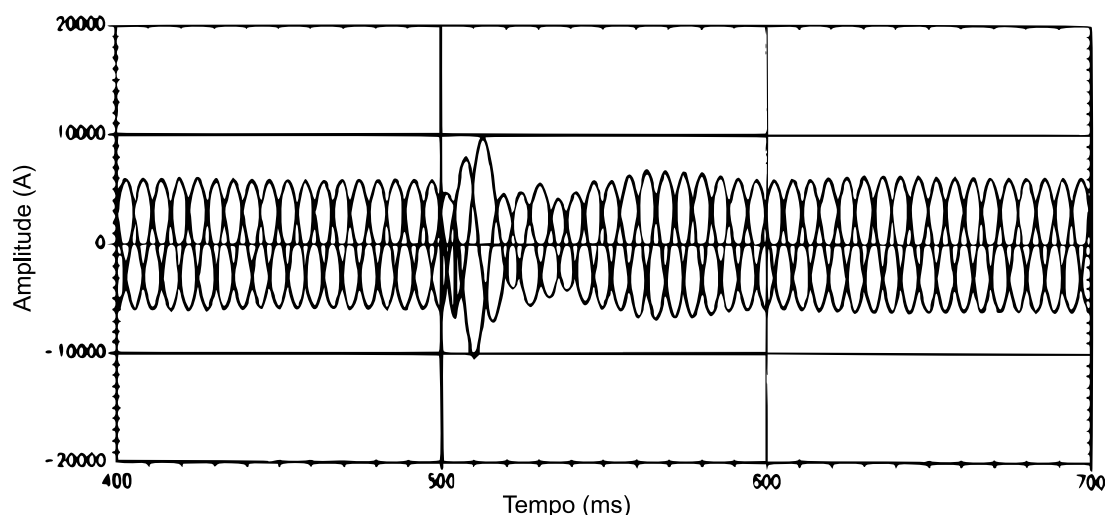
Figura 4. Ilustração do diagrama unifilar do exemplo.  
 Fonte: Adaptado de TANG, et al. (1994).

Neste sistema, é acrescentado uma falha na linha de transmissão, que provoca um afundamento de tensão na rede. Durante a falha, todo o conjunto sofre alterações significativas em seu comportamento. No sistema de transmissão e distribuição, ocorrem afundamentos monofásicos ou bifásicos, de acordo com o local analisado. Na carga, representada pelo *driver* ou motor, percebe-se uma mudança de amplitude na barra do secundário do transformador, com redução de 100 V em uma das fases, além de uma significativa alteração de forma e amplitude na corrente do motor, conforme ilustra as Figuras 5 e 6.



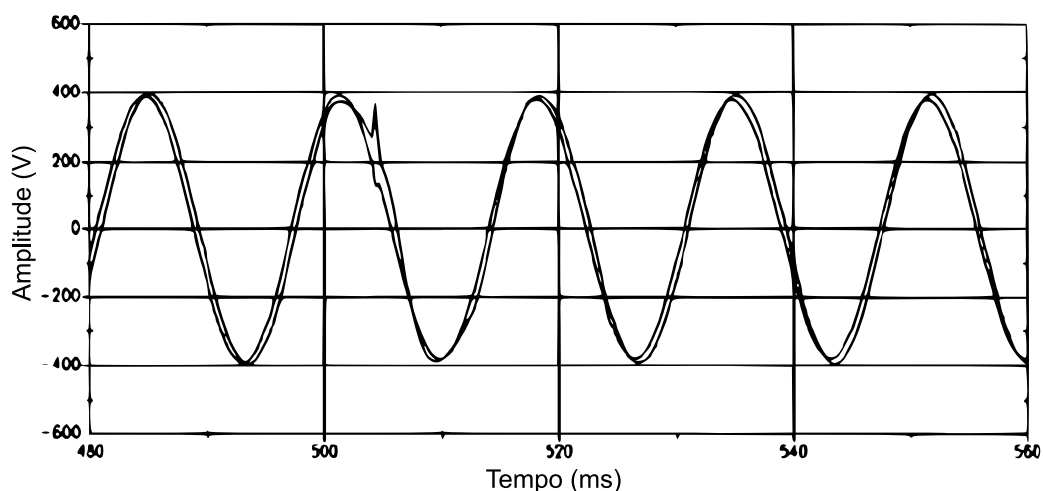


**Figura 5. Tensão na barra de 480 V, com falta monofásica.**  
**Fonte: Adaptado de Tang, et al. (1994).**



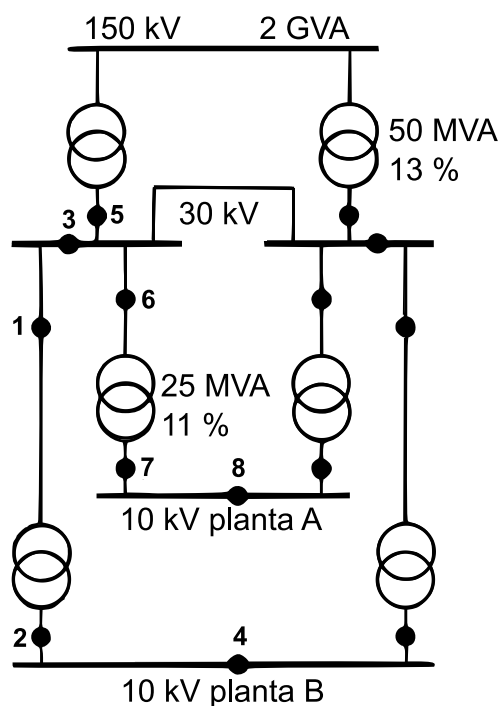
**Figura 6. Corrente de armadura do motor durante a falta.**  
**Fonte: Adaptado de Tang, et al. (1994).**

Pelas Figura 5 e 6, é possível visualizar os efeitos que um afundamento de tensão provoca em uma máquina indutiva, principalmente na corrente que circula pela armadura da máquina. Com a rede principal em falta, há uma troca de alimentação realizada pelas chaves de estado sólido, esta troca resulta em um pico de tensão na região de chaveamento, como mostrado na Figura 7, e que explica a grande variação da corrente mostrada na Figura 5. Outra possibilidade é de que a carga, cujas características dinâmicas são modeladas por potência constante, tenha provocado um aumento proporcional na corrente do barramento de 480 V. Esses acontecimentos provocam oscilações com duração de aproximadamente 100 ms (TANG, et al., 2004).



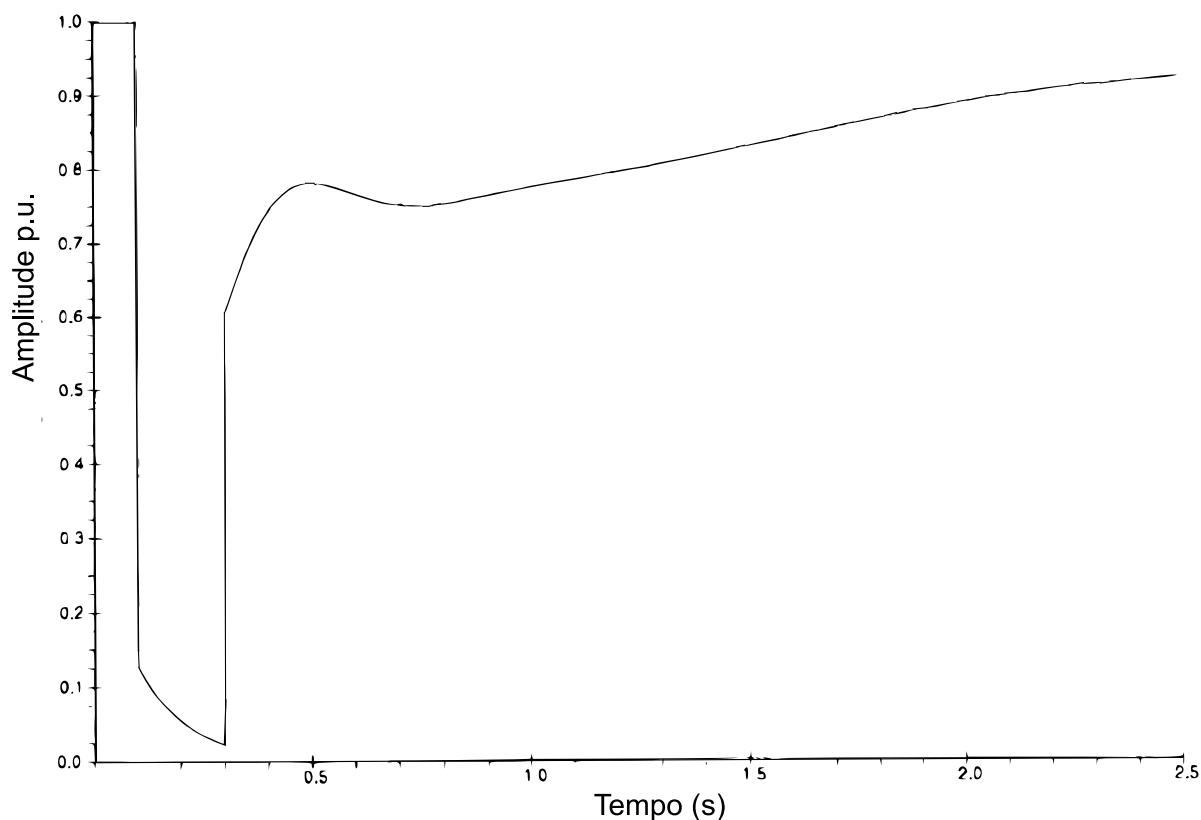
**Figura 7. Tensão da fase afetada na entrada do motor, no relé.**  
**Fonte: Adaptado de Tang, et al. (1994).**

Outro estudo realizado por Bollen (1995) sobre reaceleração de máquinas indutivas, propõe a análise de um determinado sistema de potência com motores como carga. Neste sistema, é simulada uma falta com duração de 200 ms em quatro pontos da rede: no lado de alta tensão do transformador de distribuição, no de baixa tensão deste mesmo transformador, na barra de distribuição de 30 kV e na barra do consumidor de 10 kV. Na Figura 8 é mostrada a planta utilizada.



**Figura 8. Planta do sistema de distribuição analisado.**  
**Fonte: Adaptado de Bollen (1995).**

Neste estudo, constata-se que o tempo de recuperação do conjunto depende do ponto onde ocorre à falta, com maior influência no primeiro e terceiro ponto respectivamente. Na Figura 9 é ilustrado o comportamento da tensão no lado de 30 kV do transformador de 25 MVA (lado de alta). Percebe-se que neste ponto o afundamento é significativo devido à falta de alimentação, e que a amplitude não decai a zero devido à carga acoplada no eixo do motor.



**Figura 9. Tensão no transformador de 25 MVA (lado de alta).**  
Fonte: Adaptado de Bollen (1995).

### 2.3.2 Problemas em contadores elétricos

Outro dispositivo avaliado em testes de afundamento é o contator, chave eletromecânica (relé) presente em sistemas de manobra e de proteção, com grande aplicação industrial. Geralmente, os dispositivos de controle eletromecânicos como *driver* ajustáveis de velocidade e Controladores Lógicos Programáveis (CLP) são sensíveis a distorções de tensão. Também são considerados pontos fracos em processos elétricos no que diz respeito a falhas. Independentemente do sistema em

que estão sendo utilizados, quando enfrentam distúrbios, os contatores podem causar interrupções custosas em processos industriais (COLLINS & ZAPARDIEL, 1997).

Contatores são largamente utilizados para conectar cargas a rede de distribuição como, por exemplo, máquinas de indução. Qualquer carga alimentada por este dispositivo é desconectada automaticamente quando há quedas acentuadas de tensão. Os contatores principais de um circuito de potência permanecem, em geral, na posição normalmente aberto, enquanto os auxiliares abrem durante falha de tensão, de forma a prevenir uma tentativa precoce de reiniciar a máquina antes da normalização do sistema. Este comportamento é útil quando deseja-se prevenir problemas com a partida de motores. Contudo, pode ser problemático quando a aplicação não tolera perdas de carga como em contatores de Corrente Contínua (CC) alimentados por um sistema CC separado (JEONG, LEE, & GIM, 2009).

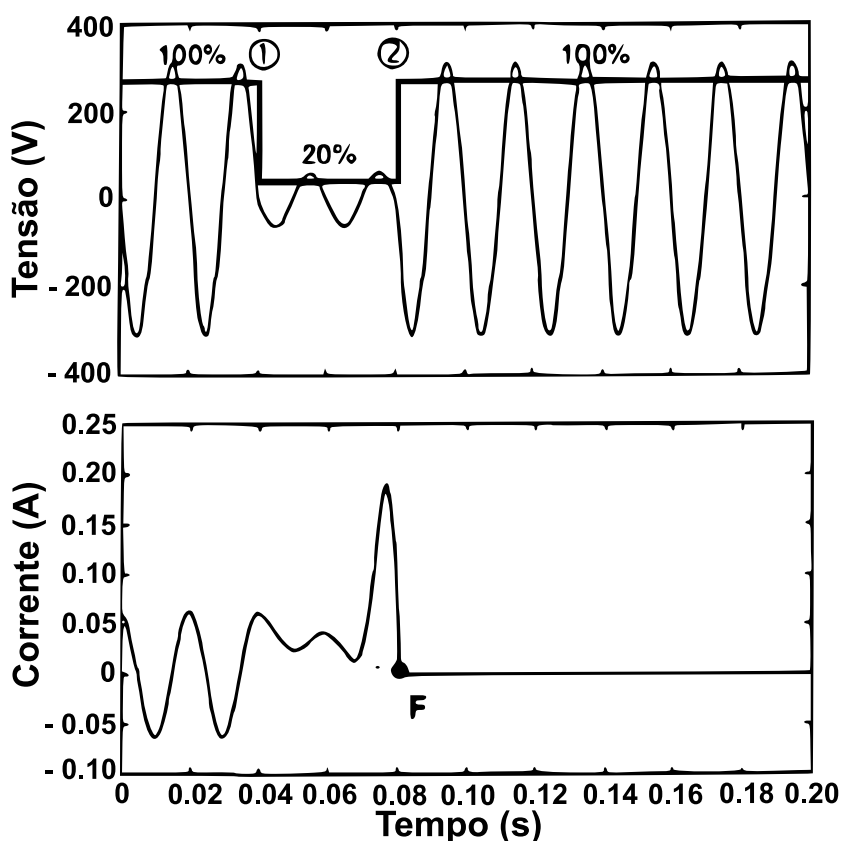


Figura 10. Tensão e corrente no contator com afundamento de 80%.  
Fonte: Adaptado de Pedra, Corcoles, & Sainz (2002).

Na Figura 10 é mostrado o comportamento de um contator CC durante um afundamento de 80% da alimentação durante 40 ms. Pode-se observar uma situação em que o dispositivo simulado apresenta falhas de funcionamento após passar por um evento de queda drástica na tensão. Este comportamento, pode ocasionar perdas financeiras e técnicas para uma indústria que dependa de um funcionamento contínuo da carga alimentada pelo contator.

### 2.3.3 Problemas em transformadores

Transformadores trabalham com Corrente Alternada (CA) cuja forma de onda é idealmente senoidal. Possuem capacidade de operar com cargas não lineares, conforme material e técnicas utilizados em sua construção. Geralmente são equipamentos resistentes a distúrbios de tensão, contudo, segundo Aldabó (2001), podem haver eventos que sensibilizem sua operação, tais como:

- Distorções com grandes variações no módulo do sinal podem provocar aumento na temperatura de operação;
- Correntes resultantes de harmônicas provocadas por afundamentos também acarretam em elevação de temperatura de operação;
- Impulsos que envolvem grande quantidade de energia podem provocar ruptura do isolamento dos enrolamentos;
- Sobretensões podem saturar o núcleo do transformador;
- Picos de corrente ou correntes de harmônicas podem interagir adversativamente com a impedância do transformador e provocar instabilidade ou deformações de onda;
- Cargas controladas por tiristores podem interagir com a impedância do transformador, durante faltas rápidas, e gerar impulsos de tensão ou corrente na saída do secundário do equipamento.

Os problemas citados anteriormente dependem de variáveis que podem afetar a sensibilidade do equipamento. Como, por exemplo, parâmetros de projeto, temperatura ambiente, concentração de harmônicos na corrente e a tensão aplicada.

Em um estudo realizado por Surisunthon & Tayjasant (2011), foi verificado o impacto causado pela Geração Distribuída (GD) em um sistema de

distribuição. O elemento escolhido para a análise foi um transformador trifásico, montado com diferentes formas de ligação. No estudo foram feitas análises de três tipos de transformadores:

- Tipo 1: ligações triângulo-triângulo, triângulo-estrela aterrada e estrela-triângulo. Conexões em que não há componente de sequência zero fluindo para a rede durante a falta. Contudo, a GD pode conter essa componente, o que pode acarretar em uma sobretensão nas fases sem curto-circuito.
- Tipo 2: ligação estrela aterrada com triângulo no secundário. A GD pode fornecer corrente de sequência zero à rede durante uma falta fase-terra.
- Tipo 3: ligação estrela aterrada no primário e secundário do transformador. Apresenta o mesmo problema do tipo 2. Se o neutro da GD possuir resistor de aterramento, a impedância de sequência será alta.

Com o auxílio de programas de simulação, Surisunthon & Tayjasant (2011) produziram um gráfico com a frequência de eventos com afundamento de tensão pelo tipo de falta ocorrida (fase-terra ou SLGF, fase-fase ou LLF, fase-fase-terra ou LLGF e trifásica ou 3PF), conforme Figura 11.

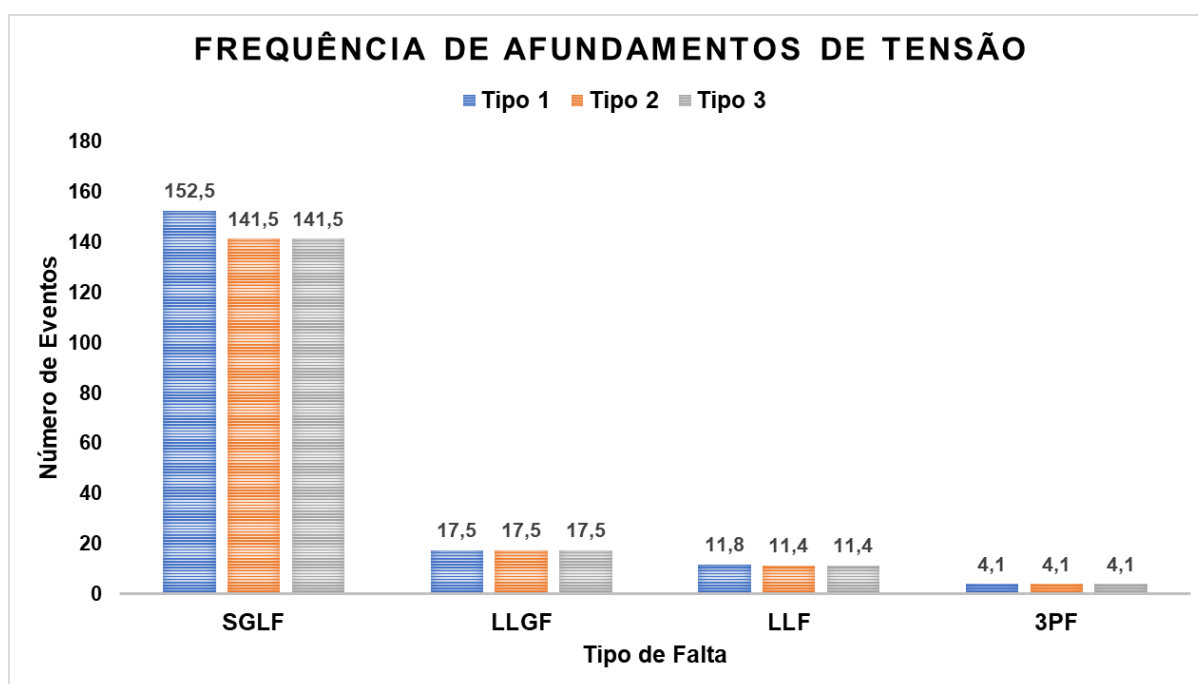


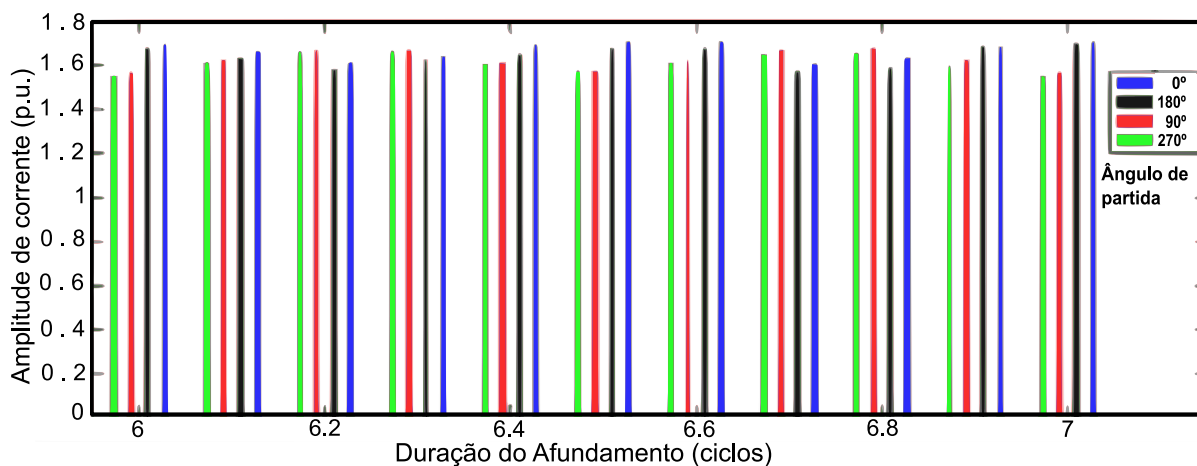
Figura 11. Número de eventos de afundamento por ano.  
Fonte: Adaptado de Surisunthon & Tayjasant (2011).

Na Figura 11, pode-se constatar que o número de ocorrências varia de acordo com o tipo de ligação do transformador e do tipo de falta que ocorre no sistema. As ligações do tipo 1 apresentaram maior número de afundamentos do que as demais ligações, de forma a evidenciar a necessidade de se realizar mais testes de influência das perturbações em determinados tipos de ligações.

#### 2.3.4 Problemas em lâmpadas de descarga

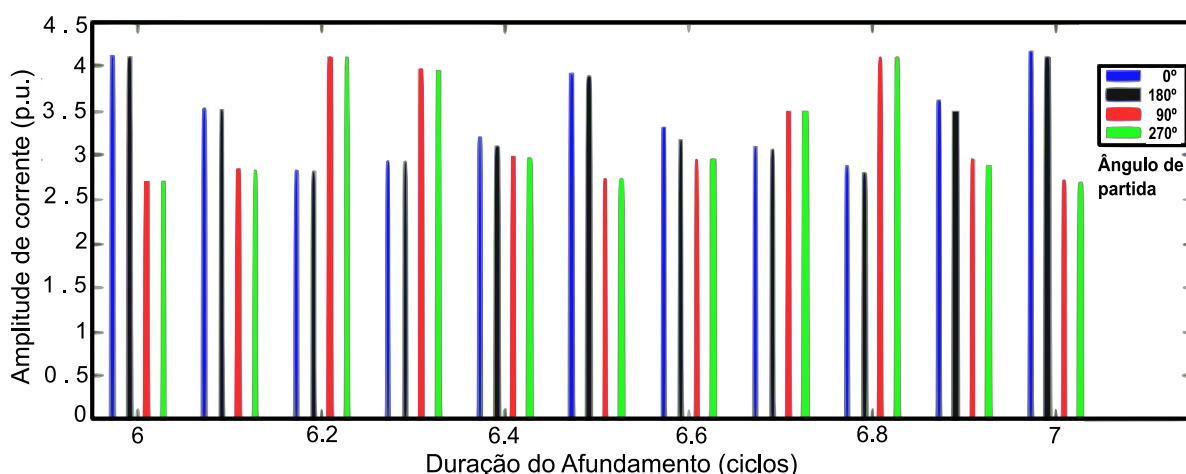
Lâmpadas de descargas são compostas por reatores eletrônicos que permitem a correta operação destes dispositivos. Os reatores dessas lâmpadas também podem apresentar mal funcionamento devido a afundamentos de tensão. Durante os transientes de operação, muitos parâmetros podem ser afetados, tais como: condutividade de plasma, temperatura da lâmpada, resistência equivalente de núcleo, reatância, resistência da lâmpada, indutância mútua e coeficiente de acoplamento entre a lâmpada e os enrolamentos (SILVA, et. al., 2013).

Em um estudo realizado por Sengul (2016), foram empregados testes com uma fonte CA programável em lâmpadas com descarga. As variáveis do afundamento ajustadas no gerador foram: duração (em ciclos de onda), amplitude (percentual referente à tensão nominal) e ângulo de ocorrência do afundamento (0 a 360° em relação ao ciclo de onda do sinal senoidal). Foram realizados dois grupos testes para verificação do comportamento durante o transitório. No primeiro, a amplitude da queda foi variada entre 50 a 80%, a duração começou em 6 a 7 ciclos (com variação de 0,1 ciclos por teste) e o ângulo de partida foi de 0°. No segundo, a duração da queda partiu de 6 ciclos e todos os passos realizados no primeiro grupo teste também foram seguidos. A diferença de objetivo do grupo teste 2 foi na determinação dos efeitos do afundamento nos ângulos de partida (0°, 90°, 180° e 270°). Na Figura 12, é mostrado o comportamento da corrente no surto provocada pela queda de 10% da tensão em lâmpadas de sódio de baixa pressão.



**Figura 12. Corrente durante um afundamento de 10% da tensão de alimentação.**  
**Fonte: Adaptado de Sengul (2016).**

Como observado na Figura 12, a amplitude da corrente de surto varia conforme a duração e o ângulo de começo do afundamento. Em geral, houve grande variação de picos de corrente por tempo de duração e começo do evento, com todos os picos superando 40% do valor da corrente nominal. Este efeito pode levar a um desgaste prematuro desses equipamentos, bem como a falhas de isolamento de partes importantes. Na Figura 13, percebe-se a diferença de amplitude quando o sistema é exposto a um afundamento de 30%.



**Figura 13. Corrente durante um afundamento de 30% da tensão de alimentação.**  
**Fonte: Adaptado de Sengul (2016).**

Na Figura 13, pôde-se observar um comportamento parecido ao que foi visto na Figura 12. A grande diferença se encontra na amplitude dos picos de correntes, que são significativamente maiores do que o caso anterior, principalmente por se tratar de um afundamento maior, de 30% em relação ao valor nominal.



Como conclusão do estudo, os autores destacam os seguintes tópicos:

- Se o sistema de iluminação inclui uma reatância de dispersão ou um reator, a corrente de surto será máxima quando o afundamento começar na passagem por zero com duração de  $(n)$  ou  $(n + 0.5)$  ciclos;
- Em sistemas de iluminação com um transformador rebaixador, se o afundamento ocorrer na passagem por zero e durar apenas  $(n + 0.5)$  ciclos, a corrente de surto terá sua amplitude máxima;
- Não só a duração, como também a magnitude da queda de tensão afeta severamente a corrente de surto. Em todos os sistemas de iluminação é percebido que o pico de corrente aumenta com o tamanho da queda de tensão;
- A duração do evento tem mais influência no surto do que o ângulo de partida. O maior valor observado acontece quando o ponto de partida do afundamento na onda coincide com o ponto de passagem por zero. Além disso, uma característica similar é vista quando o evento ocorre nos pontos de passagem dos picos da onda. Esta observação não vale para lâmpadas de descarga com reatores eletrônicos;
- Se a lâmpada opera com reator eletrônico, o ciclo  $(n + 2)$  será efetivo nestes sistemas e provocará o valor máximo de pico;
- Todos os tipos de correntes de operação das lâmpadas, com exceção das lâmpadas com reatores eletrônicos, decaem durante o afundamento. Quando lâmpadas com reatores do tipo descarga de alta intensidade (HID em inglês) são utilizados no sistema, a corrente irá aumentar durante todo o intervalo de tempo. Então, a potência de operação da lâmpada continuará nominal, a menos que faltas muito severas ocorram.

## 2.4 POSSÍVEIS SOLUÇÕES PARA DISTURBIOS DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Uma das opções para reduzir ou suprimir rápidas distorções de tensão é a utilização de compensadores em série. Esses compensadores têm a função de

nivelar a amplitude do sinal de tensão na faixa de valores toleráveis para o sistema a ser protegido (HINGORANI, 1995).

#### 2.4.1 Compensadores estáticos de tensão

Pode-se traçar diversas estratégias de eliminação das perturbações de tensão na rede elétrica. Uma das alternativas possíveis é a utilização compensadores síncronos e estáticos de distribuição, do inglês *Distribution Static Synchronous Compensator* (D-STATCOM). O D-STATCOM consiste em um inversor trifásico conectado à rede em um ponto de acoplamento comum e a carga. Essa forma de ligação permite mitigar o afundamento ou aumento momentâneo da tensão proveniente da rede (ALDABÓ, 2001), além de absorver e gerar potência ativa e reativa de forma controlada (MADHUSUDAN & RAO, 2012). Na Figura 14, pode-se observar o diagrama básico de ligação do compensador.

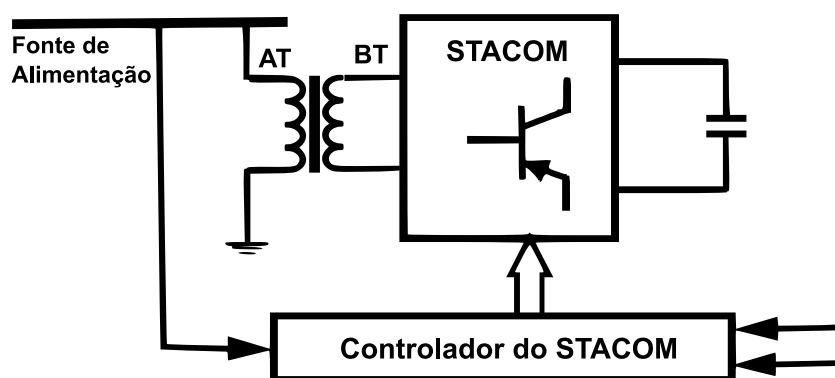


Figura 14. Diagrama típico de um STATCOM.  
Fonte: Adaptado de Pereira & Ferreira (2014).

O funcionamento deste dispositivo depende de uma diferença abrupta entre os níveis de tensão da rede e da carga. Se houver tal diferença, é gerado um sinal de compensação com a mesma fase do sinal de entrada, mas não com a mesma magnitude. Se a tensão de saída do dispositivo for maior do que a tensão no *Point of Common Coupling* (PCC), o compensador irá considerar que a carga apresenta um comportamento indutivo e injetará potência reativa no sistema. Mas, se a tensão de saída for menor do que a da entrada, o compensador irá dissipar o

excesso de potência reativa da rede para manter o valor de tensão nominal na carga (HAMOUD, DOUMBIA, & CHÉRITI, 2017).

O D-STATCOM pode ser utilizado para melhorar a qualidade do sistema em que é empregado, com redução de harmônicas e correção do fator de potência através da injeção de potência complexa. A correção é feita por meio da alteração do ângulo entre a corrente injetada e a tensão no PCC (JOSE & RAMTEKE, 2017).

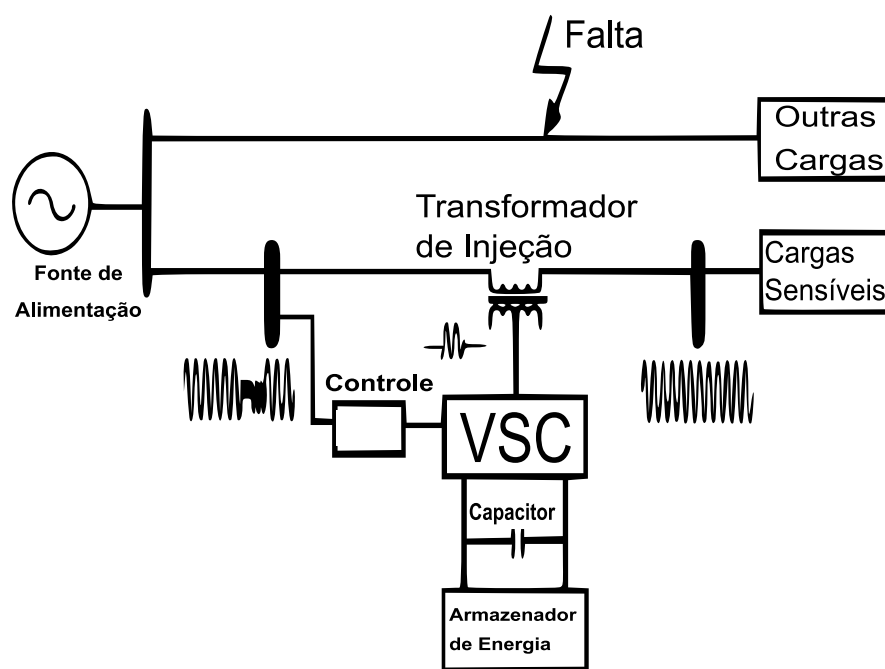
Outra forma deste conversor é conhecida como compensador estático síncrono em série (*Static Synchronous Series Compensator – SSSC*). Consiste em um STATCOM que é posto em cascata com o sistema a ser corrigido ou protegido. Seu funcionamento baseia-se em uma reatância controlada que altera a impedância da rede em que é conectada. Para realizar a compensação pura de reatância, a tensão no primário do transformador de acoplamento deve ser controlada pela corrente proveniente da fonte de alimentação (HU, et. al., 2013).

#### 2.4.2 Compensadores dinâmicos de tensão

Outra estratégia de compensação possível é a utilização de compensadores dinâmicos de tensão, do inglês *Dynamic Voltage Restorer (DVR)*. Este dispositivo é uma fonte de tensão que está conectada em cascata com a alimentação e fornece energia, com ajuda de um transformador de injeção, ao ponto onde ocorre o afundamento ou elevação de tensão (DHOKE, et al., 2018, pg. 2901). Também são constituídos de inversores de tensão, como no D-STATCOM. São utilizados para injetar um determinado valor de amplitude do sinal de entrada, de acordo com os critérios de mínima energia trocada com a rede (ALDABÓ, 2001).

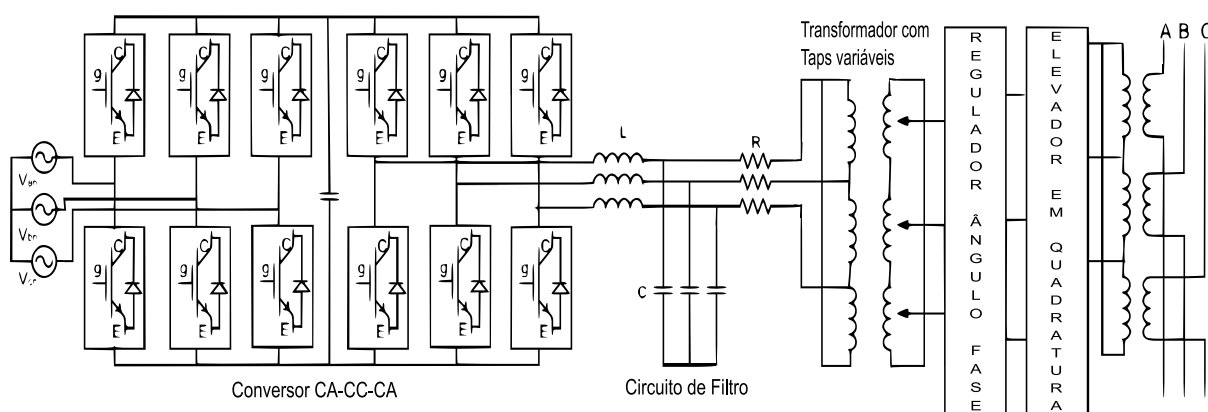
O DVR é composto por 6 partes (DHOKE, et al., 2018, pg. 2901), como mostrado a seguir e na Figura 15:

- Conversor CA-CC-CA;
- Filtro LC ou passa-baixas;
- Transformador de injeção;
- *Link* CC e armazenamento de energia;
- Equipamento de passagem ou *by-pass*;
- Equipamento de desconexão.



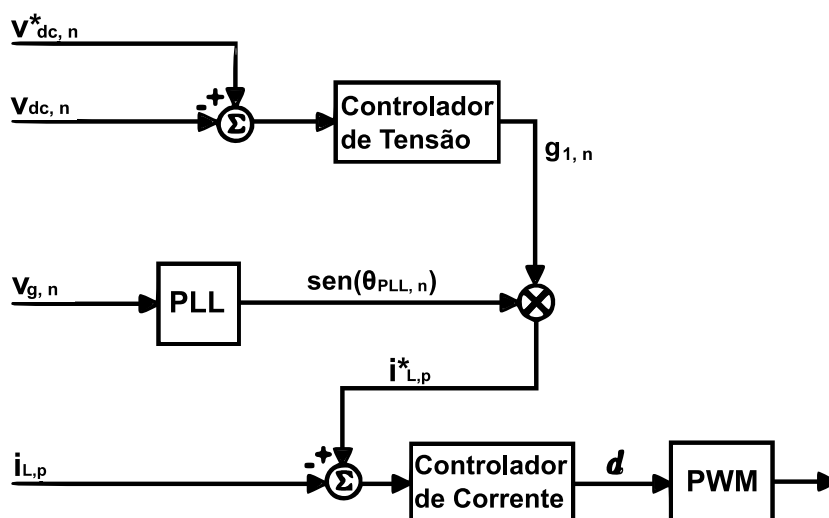
**Figura 15. Topologia Básica de um DVR.**  
**Fonte: Adaptado de Dhoke, et al. (2018, pg. 2903).**

O conversor CA-CC-CA realiza, em seu primeiro estágio, a transformação da tensão alternada da alimentação (adquirida da rede) em um sinal de corrente contínua, fazendo a devida conversão do sinal alternado através de modulação PWM. Esta tensão de saída passa por um filtro passa baixas de forma a atenuar os harmônicos de tensão produzidos pelo chaveamento do conversor CA-CC. Como resultado, uma forma de onda senoidal quase pura é encontrada no primário do transformador com variação de relações (*Taps*). Este equipamento é utilizado para reduzir a amplitude de tensão e garantir o bom funcionamento do compensador. A saída do transformador é alimentada por um regulador de ângulo de fase (em inglês *Phase Angle Regulator – PAR*) para gerar o requerido ângulo de fase (que deve ser o mesmo ângulo que o da corrente do circuito do ramo a jusante). Para compensação por avanço de fase, uma tensão em adiantamento com a corrente de linha precisa ser injetada, e então, adicionada à fonte de tensão. A operação de avanço de fase é realizada por um conversor elevador em quadratura (*Quadrature Booster*). E finalmente, a tensão é injetada na linha por meio de um transformador com relação de enrolamento de 1:1, que isola o DVR da linha a ser protegida (PATEL, et. al., 2015). Na Figura 16 é mostrado a diagrama elétrico do DVR, sem considerar o sistema de controle.



**Figura 16. Diagrama esquemático de uma estrutura típica de DVR.**  
 Fonte: Adaptado de Patel, et. al. (2018, pg. 2903).

O sistema de controle do compensador atua no inversor de frequência mostrado na Figura 16 através do PWM que atua nos transistores da etapa retificadora. Seu diagrama de blocos geral é mostrado na Figura 17. Consiste na implementação de dois sistemas de controle: um sistema de controle de tensão do barramento da carga, que utiliza uma compensação proporcional e integral (PI), e um controle de fase (PLL); além de um indutor controlador de corrente, que é modelado matematicamente por uma compensação proporcional e integral (PI). O primeiro sistema (controle de tensão) tem uma dinâmica mais lenta do que o segundo controlador (de corrente). O PLL é responsável por manter o ângulo de fase em sincronismo com ângulo da tensão de rede (RENDERS\_1, et. al., 2007).



**Figura 17. Diagrama de blocos típico para controle de um DVR.**  
 Fonte: Adaptado de Renders\_1, et. al. (2007, pg. 1013).

De acordo com Awad & Jawale (2016) existem, em geral, três técnicas de compensação que utilizam DVR em suas composições, são elas: Compensação pré-afundamento: Neste caso, a tensão injetada proveniente do DVR é calculada para compensar a tensão de carga e compará-la com o sinal de entrada; Compensação em fase: As tensões do DVR e da rede permanecem em fase; Compensação ótima de energia: Durante a operação em regime permanente, esta técnica minimiza o consumo de energia proveniente da rede.

### 2.4.3 Outras formas de compensação de tensão

Além dos compensadores citados nos subtópicos anteriores, outras formas podem ser utilizadas, com diferentes tipos de equipamentos. Um exemplo é o transformador de estado sólido (em inglês: *Solid State Transformer - SST*).

O SST provê uma diferença fundamental com a estrutura clássica de transformadores e maior aproximação com os modelos que utilizam eletrônica de potência nos terminais primários e secundários. São constituídos por três estágios: a entrada; a isolação elétrica e; a saída (WANG\_1, et. al. 2005).

Banaei & Salary (2014) propõem a implementação de um SST com a utilização de uma matriz de conversores no estágio de saída. Conforme Figura 18, pode-se observar todos os cinco blocos de operação do dispositivo proposto.

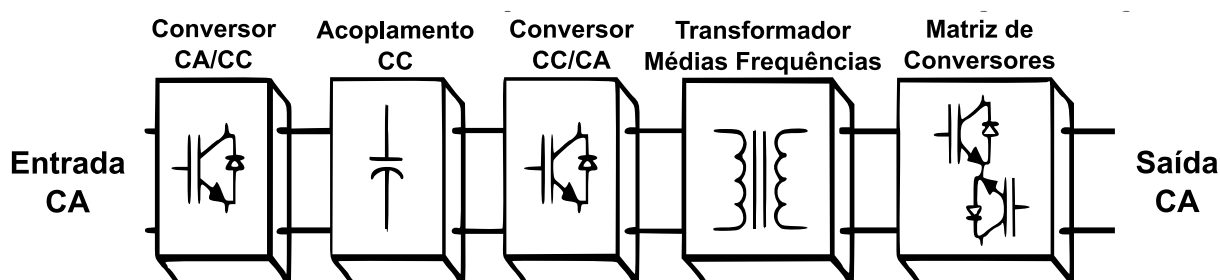


Figura 18. Diagrama de blocos de um SST com acoplamento CC.  
Fonte: Adaptado de Banaei & Salary (2014, pg. 2).

O primeiro bloco mostrado na Figura 18 trata-se de um retificador transistorizado controlado por sinais com largura de pulso (PWM) com função de controlar a forma de onda da corrente de entrada e corrigir o fator de potência (WANG\_2, et. al., 2007). Em seguida, é adicionado o acoplamento CC, cuja função

é fornecer uma referência de controle para a componente ativa da corrente de saída. (RONAN, et. al., 2002). O inversor de frequência converte a tensão CC em CA com forma de onda quadrada e esta, por sua vez, é encaminhada ao transformador de médias frequências (WANG\_2, et. al., 2007). A função deste equipamento é prover uma transformação de níveis de tensão e isolar eletricamente a fonte da carga, evitando propagação de harmônicas para a alimentação ou de surtos de tensão para a saída (WANG\_3, MAO & LU, 2008). No secundário do transformador, é adicionado uma matriz de conversores com filtro passa-baixas. Os retificadores são utilizados para corrigir os desbalanços de tensão devido a afundamentos ou elevações, seus controles são provenientes de um sinal senoidal modulado em dois sinais PWM, um para o ciclo positivo e outro para o negativo (BANAEI & SALARY, 2014).

Também é possível a utilização de geradores síncronos e assíncronos conectados em paralelo com a rede elétrica. A presença destas máquinas tem gerado um efeito positivo na tensão remanescente durante quedas de tensão. Estes equipamentos injetam potência reativa na rede durante o evento de afundamento e isto gera um aumento do nível de tensão residual. Contudo, seu efeito em redes de baixa tensão é mínimo (RENDERS\_2, et. al., 2008). Comparado ao gerador indutivo, a máquina assíncrona apresenta melhor desempenho na regulação de tensão. Isso é justificado pela potência reativa absorvida durante o processo de recuperação em um evento de afundamento.

Outra possibilidade é a utilização de filtros ativos com armazenamento de energia (*Shunt Active Filter with Energy Storage - SAFES*) em paralelo com o sistema a ser protegido (CARASTRO, SUMNER & ZANCHETTA, 2006). Esta técnica baseia-se na alocação de polos em espaço de estados para um filtro com armazenamento de energia. Também auxilia no cancelamento de componentes harmônicas no lado da carga. Durante a falta, a referência fundamental para a corrente é calculada, e o dispositivo trabalha em conjunto com a geração distribuída local para controlar a tensão no ponto comum de conexão (PCC) (IPINNIMO, et. al., 2013).

Por último, pode-se utilizar um dispositivo de desacoplamento (*Fault Decoupling Device - FDD*) em conjunto com um dispositivo de bombeamento de corrente (*Current Pump Device- CPD*), dispositivos ressonantes que reduzem a corrente de falta em cada nó e na rede. Este equipamento é instalado entre a subestação e o consumidor (CATALIOTTI, et. al., 2008). Os indutores em série e os capacitores são responsáveis por entrar em ressonância com frequência

fundamental do sistema. Quando uma corrente se aproxima do limite máximo permitido, os componentes semicondutores em paralelo com o indutor são acionados de forma a diminuir sua impedância, enquanto os dispositivos em série com o capacitor são desligados (IPINNIMO, et. al., 2013).

Considerando todas as causas, definições e problemas provocados por afundamento de tensão, no Capítulo 3, será proposta uma topologia de um gerador de afundamento monofásico para realização de testes em transformador monofásico.



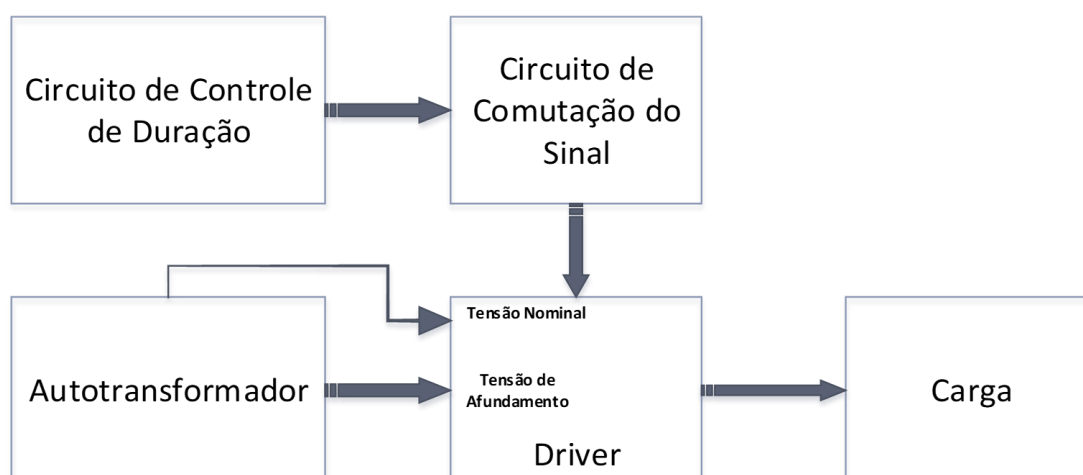
### 3 FONTE GERADORA DE DISTÚRBIOS DE TENSÃO

A partir das constatações verificadas nos estudos citados anteriormente e com a intenção de implementar um equipamento que gere tensões de diferentes amplitudes e que apresente um período ajustável de funcionamento. Foi pesquisada e proposta uma topologia de gerador de afundamentos que tenha facilidade de implementação e possa ser realizado ensaios com transformadores monofásicos

#### 3.1 TOPOLOGIA PROPOSTA

A topologia proposta, mostrada na Figura 19, está baseada no projeto desenvolvido por (MA & KARADY, 2008). O principal objetivo deste circuito é realizar os testes em equipamentos monofásicos de forma didática e com baixo custo para implementação. No Apêndice A é mostrado o diagrama de operação da fonte controlada.

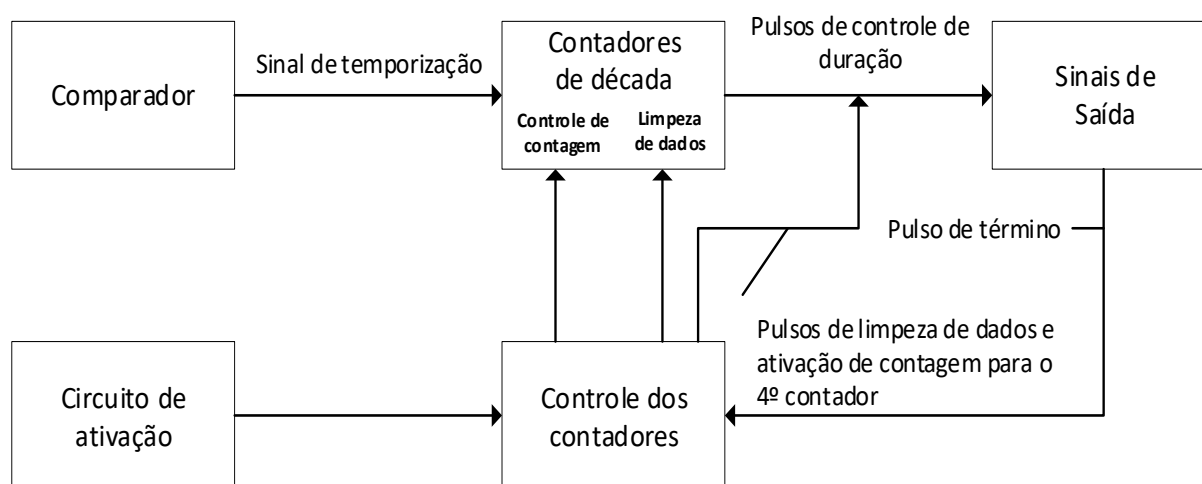
Cada módulo corresponde a um circuito com funções específicas e essenciais para o gerador. A fonte proposta foi simulada no programa Multisim 14<sup>©</sup>. A seguir, será apresentado e discutido o princípio de funcionamento de cada módulo separadamente.



**Figura 19. Diagrama da fonte proposta.**  
**Fonte: Autoria Própria (2018).**

### 3.1.1 Circuito de controle de duração

Para o controle da duração da falta, a fonte utiliza o sinal da rede como referência para determinar o período fundamental a ser trabalhado. Com isso, são enviados quatro pulsos de comando e dois sinais de controle para o circuito de comutação. Na Figura 20 é mostrado o diagrama do módulo.



**Figura 20. Diagrama do módulo de controle de duração do afundamento.**  
**Fonte: Autoria Própria (2018).**

A operação da fonte se inicia com ativação de uma chave, que encaminha o pulso para um conjunto de portas lógicas que impedem o acionamento indevido do circuito devido a ruídos de comutação da chave. Isto produz um pulso de partida para a fonte, que inicia a operação dos contadores. O pulso de término de todas as etapas deve ser selecionado de acordo com a duração desejada de funcionamento de cada etapa. Para o projeto, foi estimado que o pulso de término seja enviado no 115º ciclo de operação. Uma porta lógica “OU” é utilizada para combinar o sinal de partida e término, de forma que durante um desses eventos, haja um sinal de limpeza da informação (*reset*) dos contadores. Um flip-flop JK com borda de descida é colocado na saída do sinal de controle de forma a habilitar as saídas dos bits dos contadores durante o período de trabalho da fonte.

A tensão de linha em CA de 115 V passa por um transformador de tensão com relação de transformação de 117/6,3 V. O sinal de 6,3 V é condicionado, por meio de um divisor resistivo, para uma tensão de 3 V que é comparada com o nível

de tensão de terra por um amplificador operacional. O sinal de saída desse componente será encaminhado para o pino de temporização (*clock*) do primeiro contador. O pino de acúmulo (*carry out*) do primeiro contador, com duração de dez ciclos e cinquenta por cento de razão cíclica, será a entrada de *clock* do segundo cujo o sinal de saída do pino de *carry out* terá duração de 100 ciclos e 50% de razão cíclica.

Como exemplo, para capturar o centésimo vigésimo terceiro ciclo, basta utilizar uma porta lógica 'E' com três entradas para combinar o primeiro pulso do terceiro contador, o segundo pulso do segundo contador e o terceiro pulso do primeiro contador, de forma que a saída dessa porta será o 123º ciclo.

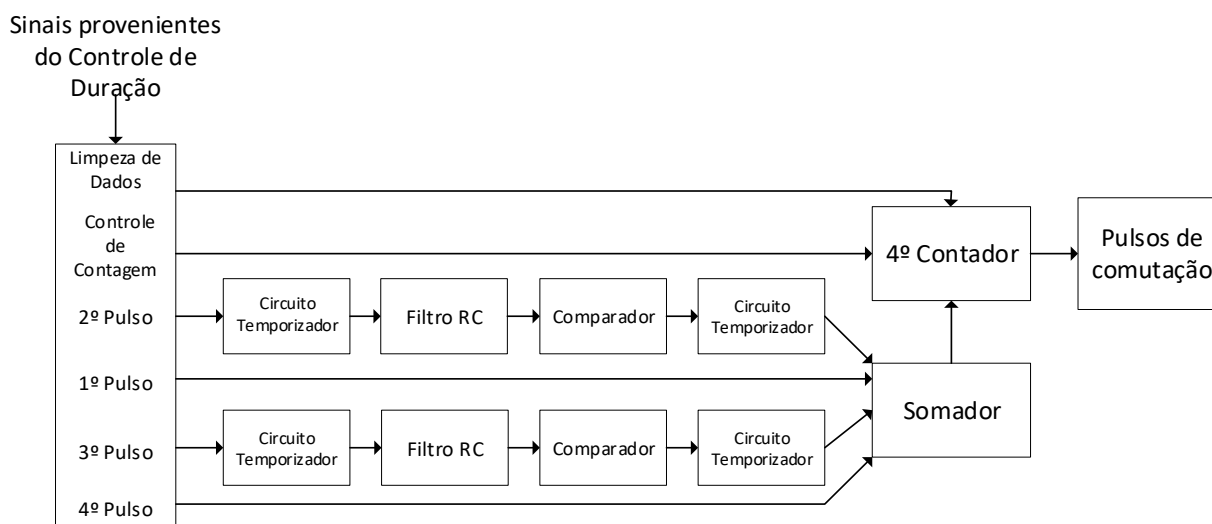
Com o objetivo de produzir 20 ciclos de tensão pré-nominal, 20 ciclos de tensão pós-nominal e 2 ciclos de afundamento, foram escolhidos 4 pulsos para o controle de duração dos períodos de tensão nominal e reduzida. As características desses pulsos são descritas abaixo:

- 1º pulso: Começo da tensão nominal de pré-afundamento;
- 2º pulso: Término da tensão nominal de pré-afundamento e início da tensão de afundamento;
- 3º pulso: Término da tensão de afundamento e início da tensão nominal pós-afundamento;
- 4º pulso: Término da operação e da tensão nominal pós-afundamento.

Estes 4 pulsos mais o sinal de controle e o sinal de ativação dos contadores são enviados ao circuito de chaveamento, que será abordado a seguir.

### 3.1.2 Circuito de comutação do sinal

O circuito de comutação é responsável por enviar os comandos de trocas de tensão para o circuito de acionamento (*driver*). Suas entradas são compostas pelos 4 pulsos de controle de duração, sinal de *reset* e de ativação dos contadores. É composto por portas lógicas, comparadores de tensão, dois Circuitos Integrados (CI) temporizadores (555), dois filtros Resistivos-Capacitivos (RC) e um contador de décadas. Os sinais de chaveamento, segundo e terceiro pulsos proveniente do circuito de controle de duração, apresentam os mesmos componentes. Na Figura 21 é mostrado o diagrama deste módulo.



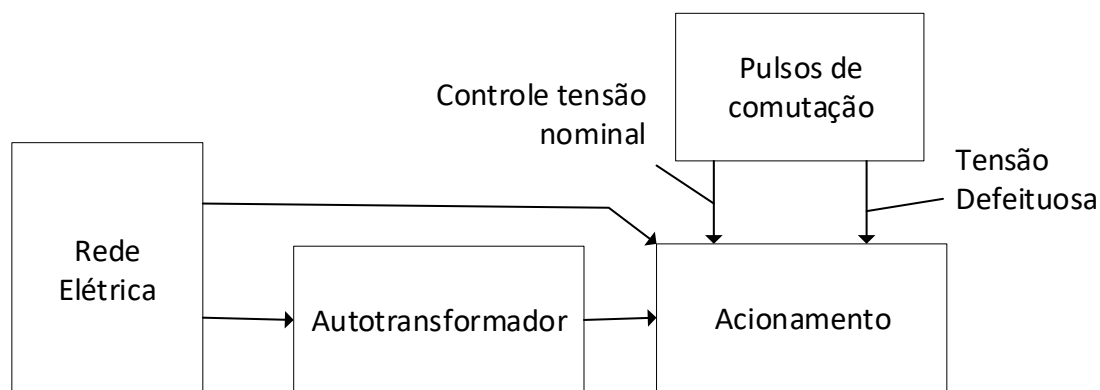
**Figura 21. Diagrama do módulo de controle de comutação dos sinais.**  
**Fonte: Autoria Própria (2018).**

O pulso gerado com um ciclo de trabalho é invertido por uma porta lógica inversora (NOT) e depois encaminhado ao temporizador, que é acionado por borda de decida. Na saída do temporizador, um pulso prolongado com dois ciclos é gerado. O pulso com dois ciclos de duração passa por um filtro RC, que o converte para um sinal exponencial. Um comparador similar ao utilizado no circuito de controle de duração compara o sinal proveniente do filtro RC com uma tensão ajustável (que varia de 0 a 5 V) gerando um atraso temporal comparável ao pulso original. O tempo de atraso é ajustado pela tensão variável do comparador. Outro temporizador é utilizado para estabilizar o sinal proveniente da saída do comparador. Os pulsos comutados pela etapa anterior mais o 1º e 4º pulsos originais são combinados para alimentar o quarto contador. Esse, por sua vez, recebe o mesmo sinal de reset proveniente dos demais contadores. O pino de clock do 4º contador recebe um pulso combinado com a soma dos pulsos de comando para comutação de início e fim do afundamento. As saídas Q1 e Q3 somadas do 4º contador referem-se ao controle de duração da tensão nominal, enquanto a saída Q2 possui os pulsos de controle de duração da tensão de afundamento.

### 3.1.3 Autotransformador

Para gerar as tensões nominal e de afundamento, será utilizado um autotransformador. Estas tensões diferentes estarão sincronizadas entre si. Este

projeto pode gerar sinais de afundamento de tensão, de aumento de tensão ou sinais de falta. Para teste de funcionamento, foi simulado um autotransformador rebaixador que fornece uma tensão especial de 57,73% do valor nominal da rede. Na Figura 22 é mostrado a configuração do autotransformador mais o circuito de *driver*.



**Figura 22. Diagrama do autotransformador e do circuito de Driver.**  
**Fonte: Autoria Própria (2017).**

### 3.1.4 Driver

O circuito de acionamento da carga (*driver*) deve receber as duas tensões de alimentação, controladas pelos pulsos de comando e deve fornecer um sinal composto pela tensão nominal e a tensão de amplitude alterada. Os estados das chaves são controlados pelos sinais provenientes do circuito de comutação. Utilizam-se relés que fecham quando recebem tensão e desligam automaticamente quando a amplitude do pulso de comando tende a zero. Na Figura 22 é mostrada a composição do circuito simulado.

## 3.2 SIMULAÇÕES

As simulações do gerador de defeitos foram realizadas pelo programa Multisim<sup>®</sup> 14. Foram utilizados subcircuitos para confecção de cada módulo. Foram realizadas adaptações na topologia de partes do projeto, para que sistema apresentasse melhor resposta quando fosse implementado.

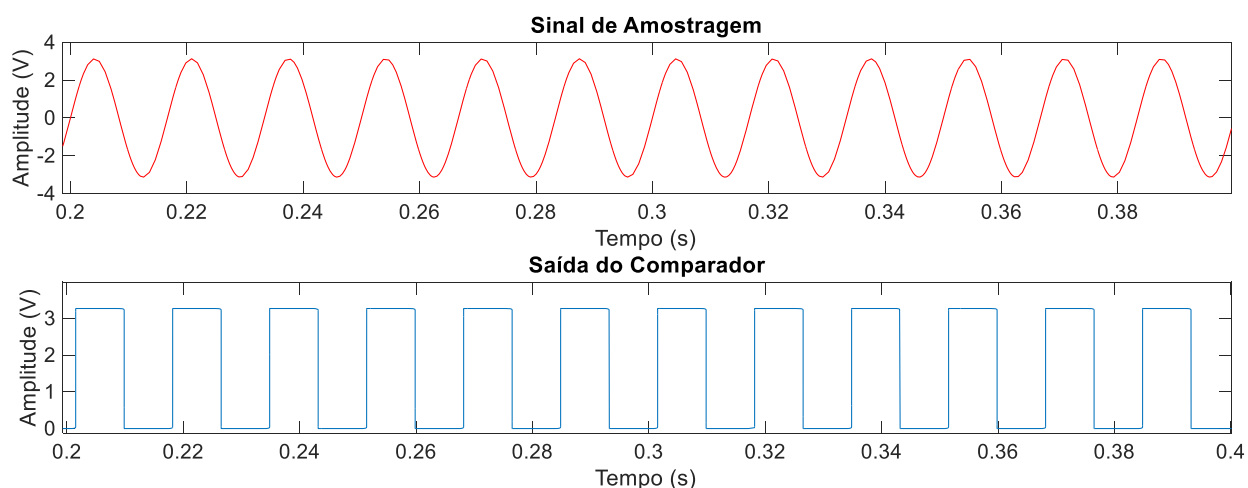
### 3.2.1 Circuito de controle de duração

Primeiramente, foi realizada uma modificação no circuito de comparação que amostra a frequência do sinal proveniente da rede elétrica. Ao invés da utilização de um comparador simples, como no projeto, foi utilizado um comparador com histerese (*Schmitt Trigger*) com realimentação positiva em cascata com um ganho inversor e um grampeador de tensão, conforme Figura 23.



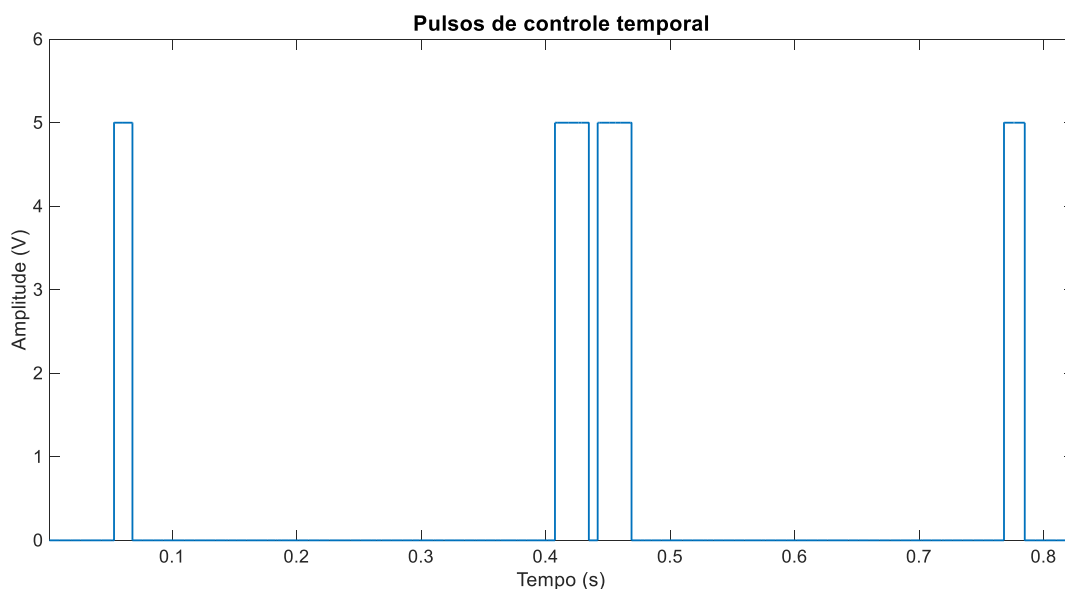
**Figura 23. Circuito amostrador de tensão.**  
**Fonte: Autoria própria (2018).**

Neste circuito, percebe-se o aumento de componentes em comparação ao circuito original (comparador simples). Contudo, houve um aumento de confiabilidade dos pulsos gerados pela comparação, evitando comutações indevidas causadas por perturbações no sinal da rede. Na Figura 24 é mostrado o sinal de saída do comparador, onde são mostrados o sinal de entrada (amostra de tensão) e o sinal de saída (saída do comparador).



**Figura 24. Sinal de saída do comparador.**  
**Fonte: Autoria própria (2018).**

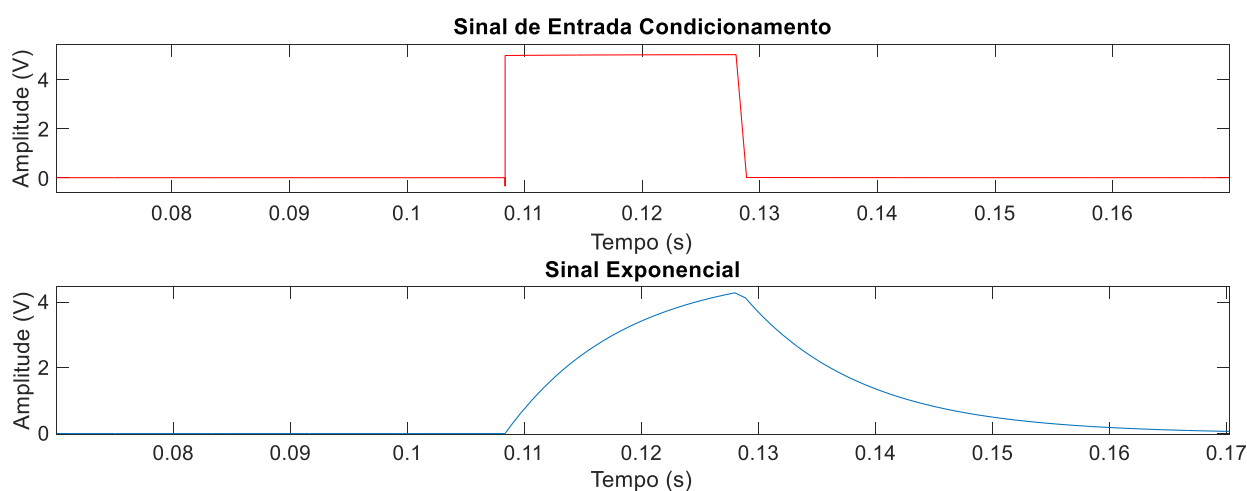
Posteriormente, são gerados os principais pulsos do módulo de controle de duração, que são chamados de pulsos de comando. Quatro pulsos são utilizados para a comutação dos sinais nominal e especial (afundamento, elevação ou interrupção). Outros dois são utilizados para sincronizar o quarto contador de décadas (presente no módulo de comutação de sinais). Na Figura 25 pode-se verificar os quatro sinais de controle de tempo.



**Figura 25. Pulsos de controle de duração do sinal gerado pela fonte.**  
**Fonte: Autoria própria (2018).**

### 3.2.2 Circuito de comutação do sinal

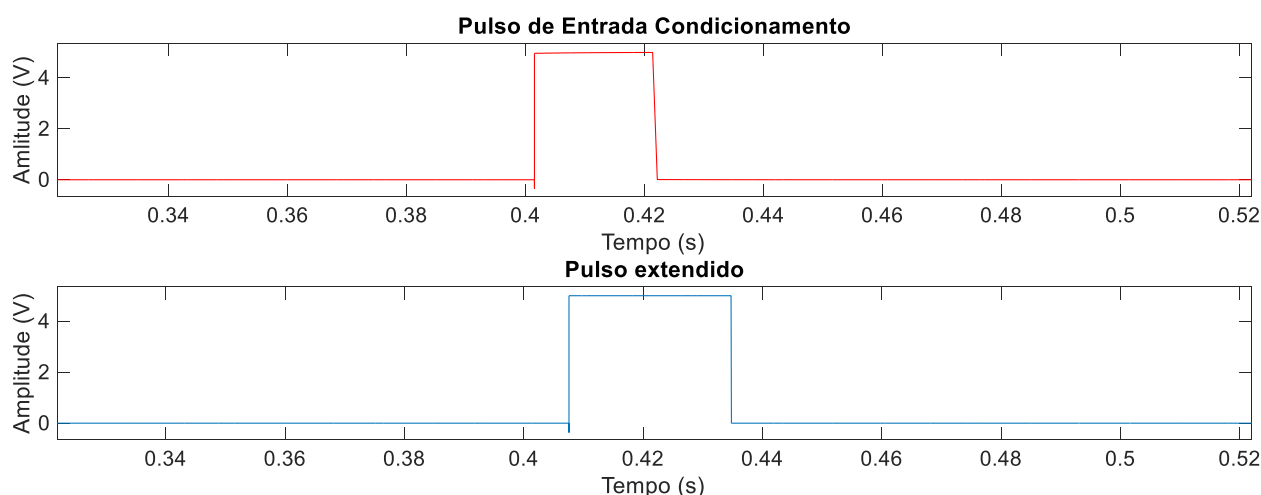
Os pulsos recebidos do circuito de controle de duração são tratados neste módulo. O segundo e o terceiro pulso recebem um atraso de comutação para evitar conflito durante o chaveamento de sinais (nominal e especial). Entre as operações importantes desse procedimento estão o deslocamento temporal dos pulsos que realizam a troca de sinais e os sinais de controle que são enviados para o circuito de acionamento. Na Figura 26 é mostrado o pulso exponencial provocado pelo filtro passivo do módulo.



**Figura 26. Pulso de entrada e pulso exponencial gerado pelo filtro passivo.**  
**Fonte: Autoria própria (2018).**

Como observado na Figura 26, o pulso que entra no circuito de comutação sofre uma alteração de forma provocada pela passagem pelo filtro passivo. O sinal exponencial resultante chega até um comparador simples, onde volta a ter a forma de um pulso de onda quadrada. O pulso resultante passa por uma porta lógica inversora e entra no pino de gatilho do temporizador, que gera um outro pulso de onda quadrada, só que prolongado. Na Figura 27 é possível verificar o atraso temporal e o prolongamento do pulso recebido do módulo anterior.





**Figura 27. Pulso de entrada do temporizador e pulso de saída comutado.**

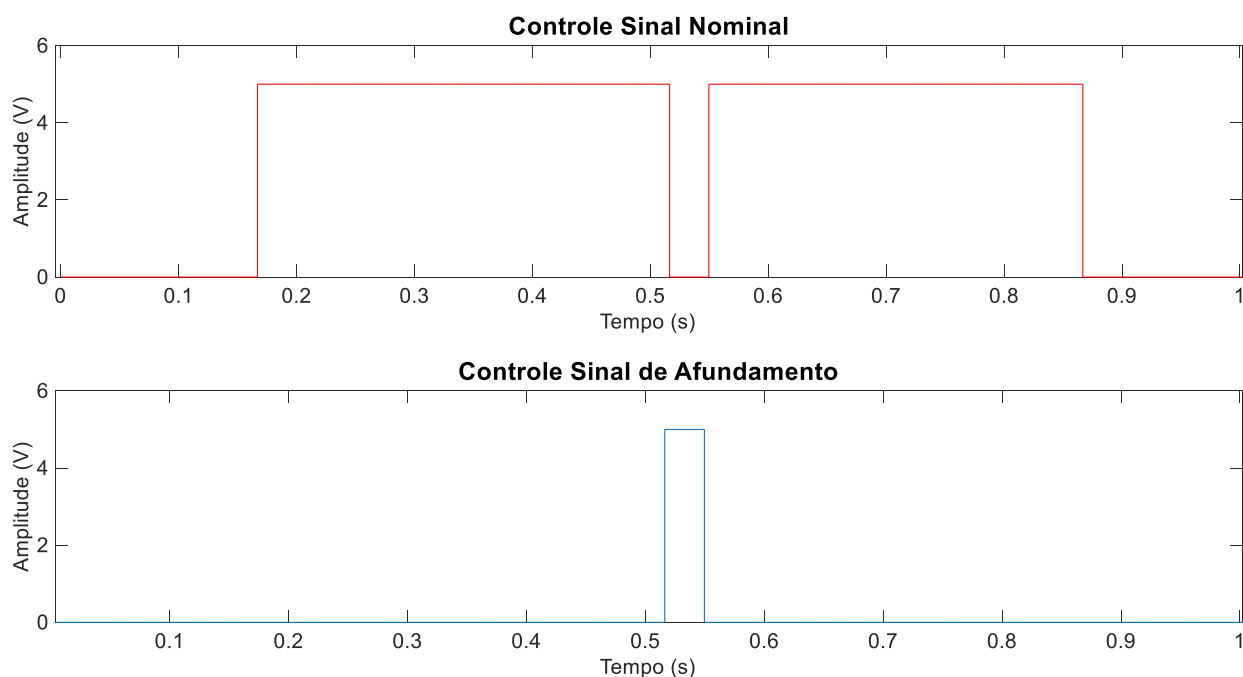
**Fonte: A autoria própria (2018).**

Na Figura 27 são mostrados os sinais provenientes da entrada do circuito de condicionamento e da saída do temporizador. Esse prolongamento e atraso dos pulsos de controle de duração do afundamento é importante para estabilizar o sinal e gerar o atraso necessário para o correto chaveamento dos relés que controlam as tensões nominal e de afundamento do gerador.

Os pulsos que receberam o condicionamento de sinal serão então encaminhados a uma porta lógica de soma. A saída do somador lógico é encaminhado ao quarto contador de décadas da fonte. E posteriormente são retirados os pulsos que servirão de comando para o circuito de acionamento.

### 3.2.2 Pulsos de controle e saída do gerador de faltas

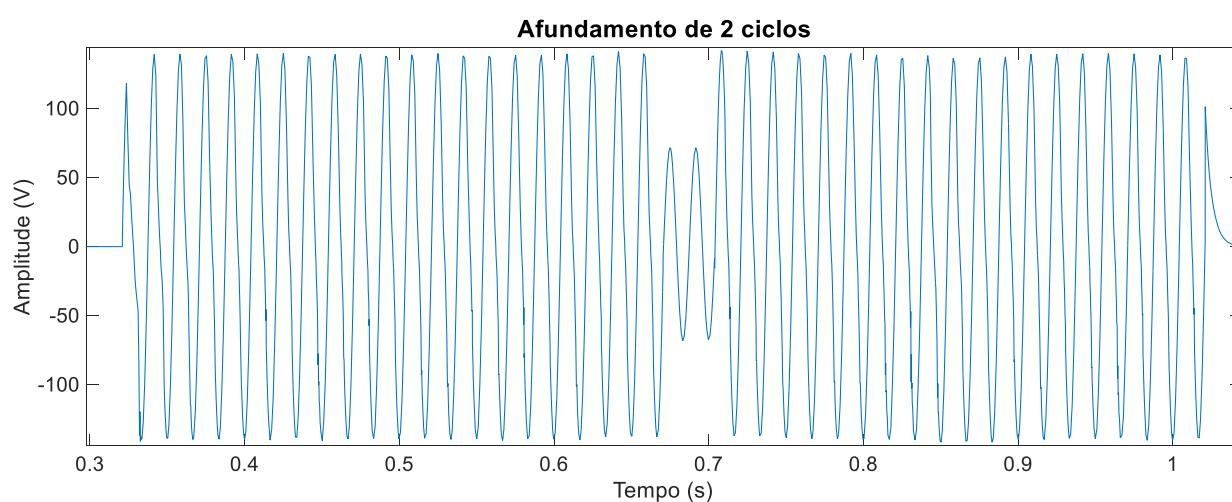
O circuito de comutação de sinais encaminha sinais de controle para os relés de estado sólido. Esses componentes mudam de estado de acordo com a duração de cada etapa do gerador. Esses pulsos são gerados pelo quarto contador de décadas, que recebe, em seu pino de temporização, uma combinação dos quatro pulsos de controle de duração vistos na Figura 25. Na Figura 28 é mostrado a simulação dos sinais de controle dos relés de estado sólido.



**Figura 28. Pulso de entrada do temporizador e pulso de saída comutado.**

**Fonte: Autoria própria (2018).**

Como observado na Figura 28, os pulsos de controle dos relés são complementares, isto é, nunca são ativados ao mesmo tempo. Na Figura 29 é mostrado a simulação do sinal gerado pela fonte de defeitos para duração de 20 ciclos de onda nominal pré-afundamento, 2 ciclos de afundamento de tensão em 0,5 p.u. e 20 ciclos de onda nominal pós-afundamento.



**Figura 29. Sinal simulado de saída do gerador de defeitos.**

**Fonte: Autoria própria (2018).**

É possível observar, na Figura 29, que o gerador produz o sinal pretendido de acordo com esperado no projeto.

## 4 PROCEDIMENTOS PRÁTICOS

Neste capítulo serão abordados os métodos utilizados para implementação prática do gerador proposto. Serão mostradas as topologias utilizadas para realização da operação desejada, bem como melhorias propostas na obtenção dos resultados.

### 4.1 ELABORAÇÃO DO *LAY-OUT* DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

A confecção das Placas de Circuito Impresso (PCI) foi desenvolvida pelo programa EAGLE<sup>®</sup> em sua versão de estudante. Alguns componentes utilizados no programa são diferentes dos simulados, contudo, apresentam funções similares. Utilizou-se placas de Fenolite para montagem das placas que compõem o gerador.

Como a fonte apresenta característica modular, inicialmente foi montado duas placas, uma para o circuito e controle de duração e outra para o circuito de comutação de sinais.

Posteriormente foi desenvolvido um protótipo definitivo que abordasse toda a parte de controle da fonte e sistemas de proteção.

#### 4.1.1 Conjunto inicial de testes

Inicialmente foi realizada a montagem da fonte em duas placas conectadas por condutores aéreos. Este conjunto será detalhado nas próximas subseções.

##### 4.1.1.1 Circuito de controle de duração

O desenho do circuito para PCI foi desenvolvido com base na topologia desenvolvida na simulação do gerador. No Apêndice B são mostrados os diagramas

utilizados para realização do *layout* da PCI. A alimentação da fonte realizada por uma fonte CC de 5 V simétrica. Foi realizada a troca do comparador simples por um comparador com histerese, cuja a função é realizar a comparação entre um sinal amostrado da rede elétrica e um referencial nulo (terra) e transmitir um pulso de onda quadrada com a mesma frequência e fase da rede. A topologia do comparador com histerese utilizada inverte o sinal de saída em relação à referência, por isso, foi utilizado um ganho inversor de forma a ajustar a polaridade do sinal de temporização. Também foi adicionado um grampeador ativo de tensão, para eliminar as componentes negativas de tensão da saída do conjunto do comparador.

A troca de tempos de atuação do gerador é feita por barramentos de pinos adicionados entre os contadores e as portas lógicas multiplicadoras de três entradas. Esses barramentos foram dispostos em 3 fileiras em paralelo nas saídas dos contadores e uma fileira simples nas entradas dos multiplicadores. De forma que, com a utilização de conectores, é possível trocar o arranjo de portas de todos os pulsos gerados pelos contadores de décadas. No Apêndice E é mostrado o desenho obtido para confecção da PCI, a figura representa uma vista superior da placa desenvolvida.

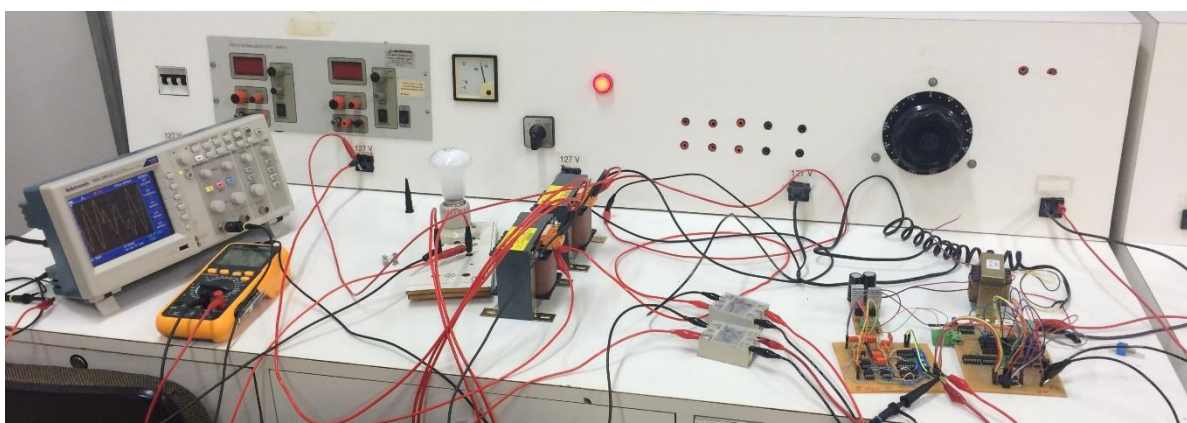
Na placa mostrada no Apêndice E, percebe-se a utilização de um total de 9 circuitos integrados, 2 conectores de três pinos, 14 barramentos simples de 3 pinos, 9 barramentos simples de 7 pinos, um barramento de 2 pinos e outro de 4 pinos. Também foram necessários à utilização de conectores *jumper* para evitar o uso de uma placa de dupla face, esses conectores foram adicionados a parte superior da placa.

#### 4.1.1.2 Circuito de comutação de sinais

Neste módulo, foi realizada a confecção do desenho para PCI com base na topologia desenvolvida na simulação do circuito de comutação de sinais. No Apêndice D é mostrado o diagrama utilizado para realização do *layout* da PCI. O comparador simples LM311n foi mantido nesta placa devido sua característica de mitigar os ruídos de comparação presentes na placa. Este circuito tem função de gerar um atraso no pulso a ser condicionado, de forma a enviar um sinal estável para

o contador de décadas e permitir a comutação na passagem por zero do sinal senoidal proveniente da rede.

Para a comunicação entre a placa de controle de duração e a de comutação de sinais, foi colocado um barramento de pinos simples com 4 pinos. Três barramentos simples de dois pinos foram colocados para fazer a ligação dos sinais de controle do quarto contador utilizado, de alimentação da fonte e pinos de terra (GND - *ground*). O comparador foi ajustado para eliminar os ruídos provenientes da rede na comutação de sinais. No Apêndice F é mostrado, em tamanho real, o desenho da placa de circuito interno e seus respectivos componentes. Esta placa foi confeccionada em uma camada, por isso foi necessária a utilização de fios aéreos (*jumpers*) para completar os caminhos do circuito. Na Figura 30 é mostrado o conjunto inicial utilizado para testes.



**Figura 30.** Foto do conjunto inicial de testes.  
Fonte: Autoria própria, 2018

#### 4.1.2 Conjunto final de testes

Após constatado o funcionamento da topologia, foi projetada uma placa definitiva para o gerador de faltas. Nesta placa, foram realizadas mudanças importantes em algumas estruturas do circuito original, de forma a garantir resultados melhores, independente das condições de teste da rede elétrica utilizada. O *lay out* da placa é mostrado no Apêndice G, H e I. Na Figura 31 é mostrada uma foto da placa confeccionada.

A primeira mudança empregada foi eliminação dos conectores aéreos da primeira placa, utilizando-se de uma placa de duas camadas e de conectores entre as camadas (vias). Esta mudança contribui com a redução de ruídos elétricos provenientes de ligações de soldas e mal contatos dos condutores aéreos.

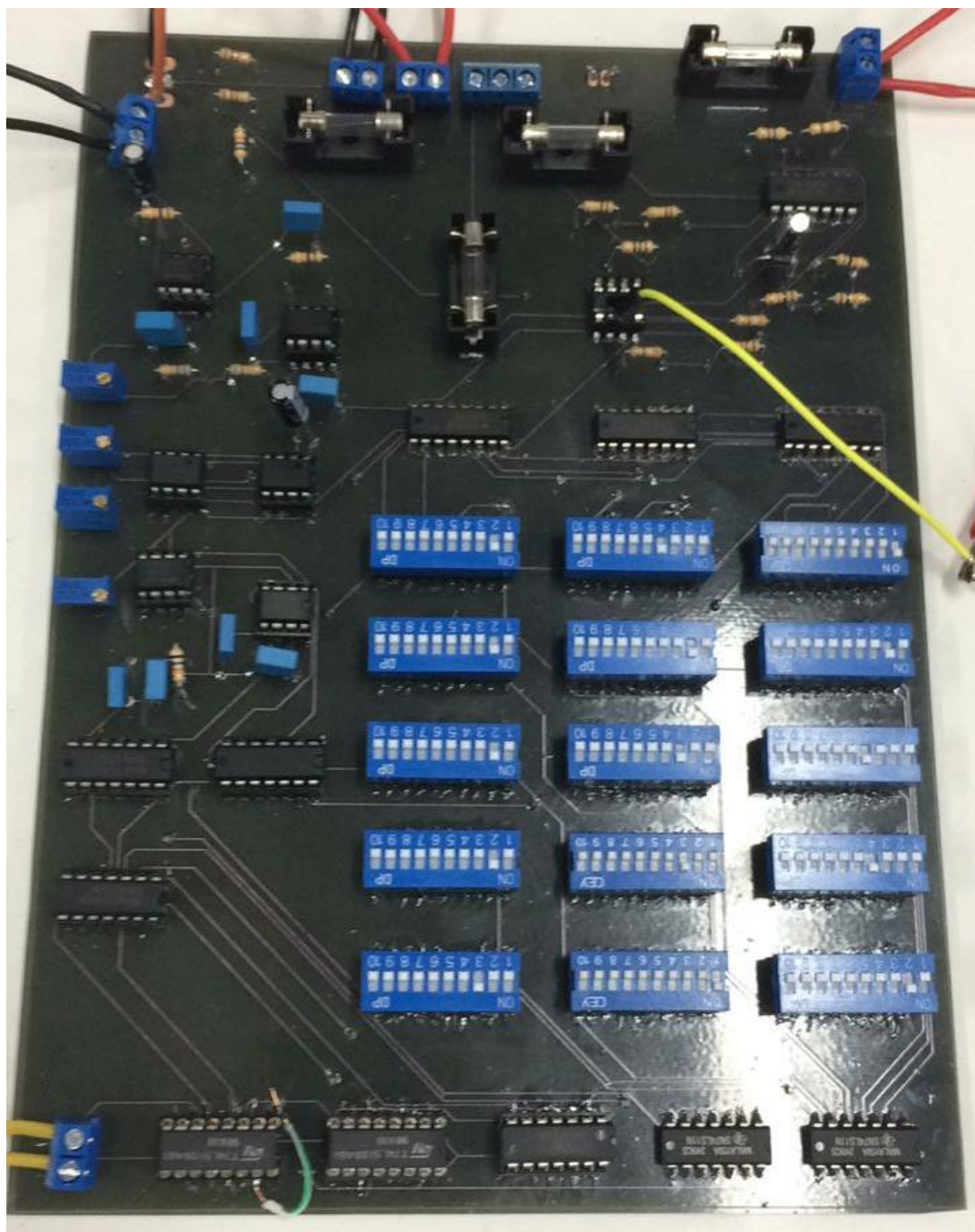
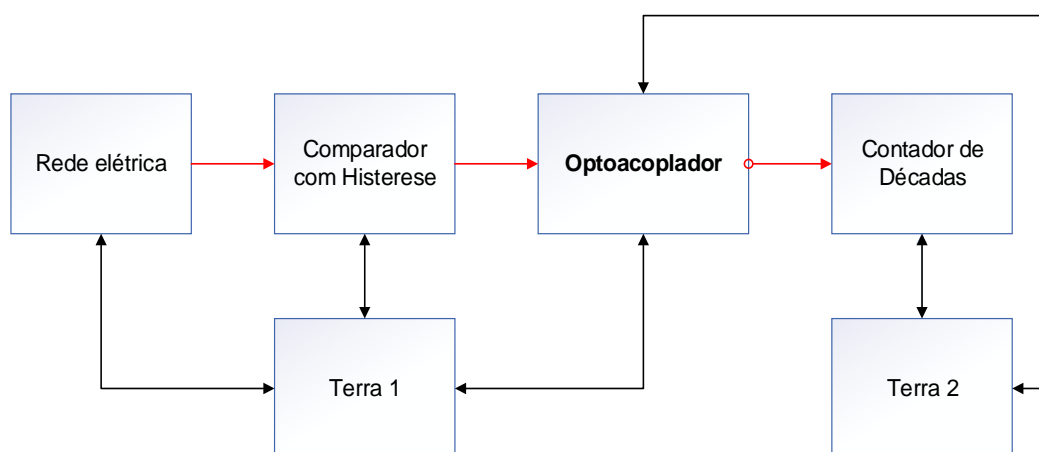


Figura 31. Foto da placa definitiva implementada.  
Fonte: Autoria própria, 2018

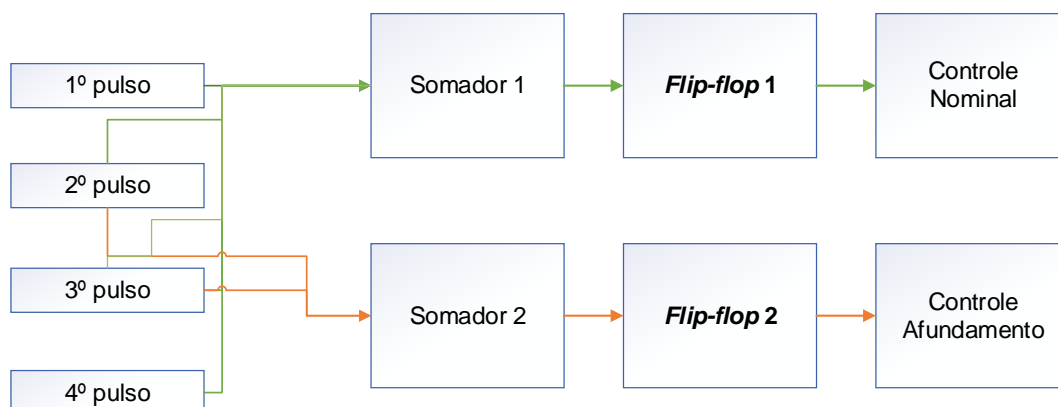
Outra mudança implementada foi a utilização de chaves piano (do inglês *Dip switch*) de 10 entradas e ângulo de chaveamento de  $180^\circ$  para realizar os ajustes dos pulsos de controle temporal da fonte. Com esta mudança, elimina-se totalmente a presença de condutores aéreos entre circuitos internos da placa e, com isto, reduz-se possíveis mal contatos existentes nas ligações da placa de controle temporal anterior.

Um optoacoplador foi adicionado entre o circuito do comparador de tensão e o pino temporizador do 1º contador de décadas da fonte. Esse dispositivo foi adicionado para isolar eletricamente a tensão alternada proveniente da rede do circuito de controle temporal. Impedindo que efeitos eletromagnéticos do transformador analisado interfiram no funcionamento dos circuitos integrados da placa. Na Figura 32, é representado o diagrama da isolação elétrica entre o comparador com histerese e os demais componentes do circuito de controle.



**Figura 32. Isolação elétrica da placa definitiva.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Por último, o 4º contador de décadas foi substituído por dois *flip-flop* dispostos na configuração D (do inglês *toggle*). Esta mudança diminui a sensibilidade deste último componente do gerador, além de manter a funcionalidade do componente substituído. Na Figura 33, é mostrado o diagrama elétrico da substituição realizada no final do circuito de comutação de sinais. Com esta alteração, espera-se obter melhor otimização dos dispositivos e eliminar o problema com interferências eletromagnéticas do CI 4017. Tais problemas foram observados nas placas iniciais e interferiram no correto funcionamento do gerador de faltas.



**Figura 33. Diagrama do novo circuito de controle de chaveamento.**  
**Fonte: Autoria Própria, 2018.**

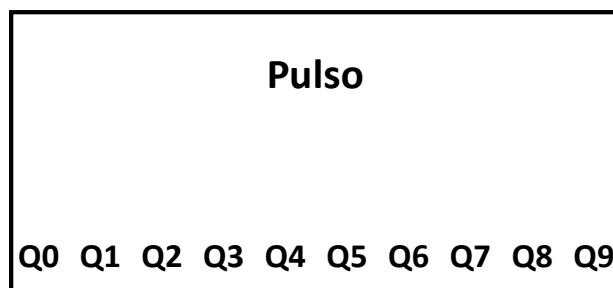
Com relação à disposição das chaves utilizadas na placa implementada na Figura 31, o posicionamento de cada chave em relação aos pulsos de operação do gerador é mostrado na Figura 34.

Contador de Centenas	Contador de Dezenas	Contador de Unidades
1º Pulso	4º Pulso	Pulso de Término
2º Pulso	1º Pulso	2º Pulso
4º Pulso	3º Pulso	3º Pulso
3º Pulso	2º Pulso	4º Pulso
Pulso de Término	Pulso de Término	1º Pulso

**Figura 34. Mapeamento das chaves Seletoras.**  
**Fonte: Autoria Própria, 2018.**



Cada bloco indicado na Figura 34 representa uma chave de 10 canais. Na Figura 35, é mostrada a configuração de saída da contagem de cada contador por meio das chaves de 10 canais.



**Figura 35. Diagrama da chave seletora de 10 canais.**  
**Fonte: Autoria Própria, 2018.**

No Capítulo 5 serão abordados os resultados obtidos com as placas desenvolvidas nesse capítulo. Também serão discutidas algumas observações sobre o funcionamento da fonte no que se refere às condições de teste da carga escolhida.

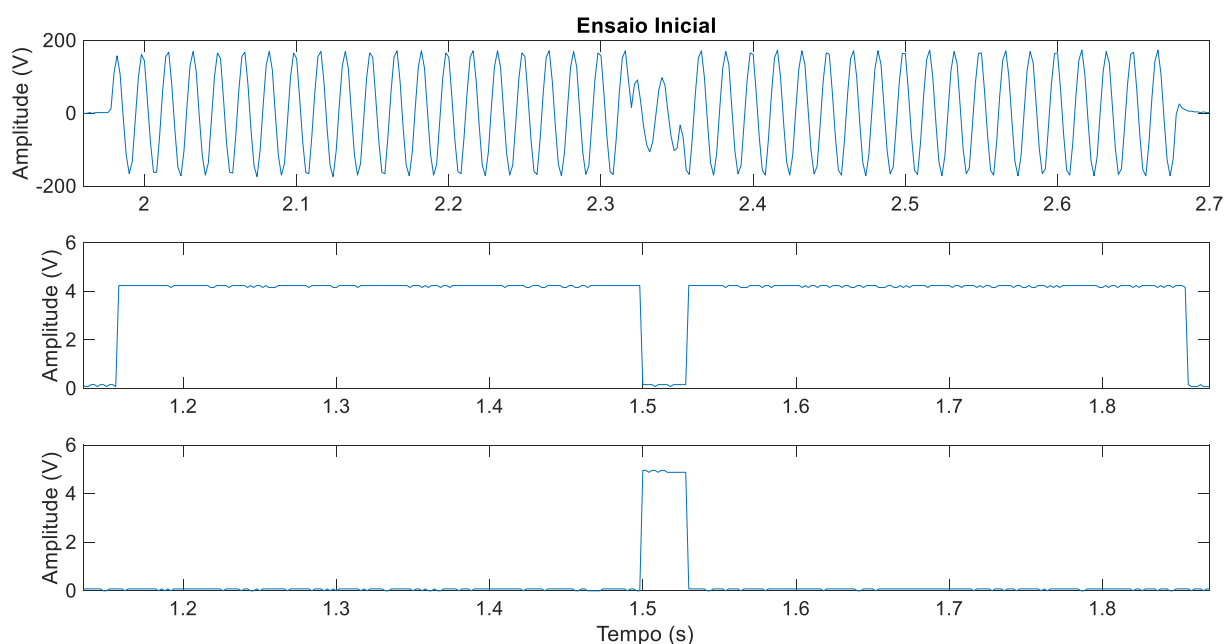
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão abordadas as formas de onda obtidas com os testes práticos do gerador de afundamento. Também serão expostas considerações sobre as características observadas na prática, como por exemplo, os tempos de chaveamento, os ângulos de disparo e outros assuntos relevantes à interpretação dos resultados.

### 5.1 ENSAIO INICIAL

Os testes iniciais foram realizados utilizando-se duas placas separadas, uma contendo o circuito de controle de duração e outra o circuito de comutação de sinais. Para gerar o pulso nominal de 220 V, foi utilizado um transformador monofásico 127/220 V de 250 W, disposto na configuração elevador de tensão. O sinal atenuado foi obtido da bancada, neste caso, de 127 V.

Na Figura 36 são mostrados os primeiros resultados obtidos, que representam as formas de onda geradas nos circuitos internos da placa. Desta forma é possível constatar o correto funcionamento de todas as partes do gerador. É possível verificar que o afundamento é bem pronunciado em dois ciclos de onda, em que há 20 ciclos de tensão nominal antes e depois do afundamento. São mostrados os pulsos de controle obtidos nos testes práticos do gerador de faltas. É possível verificar que os dois sinais são complementares um ao outro, de forma a impedir um curto-circuito entre as fontes de tensão utilizadas.



**Figura 36. Tensão obtida no secundário do transformador e sinais de controle dos relés.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Devido a problemas de interferência na operação dos três contadores iniciais, não houveram outros testes com estas placas. No subitem 5.2 serão apresentados os resultados obtidos com a placa definitiva.

## 5.2 ENSAIOS FINAIS

Os resultados foram obtidos por um osciloscópio TEKTRONIX® TDS 2012c de dois canais. Foi utilizada a placa do Anexo I alimentada por duas fontes simétricas de 5 V. Para configuração dos ciclos de tensão pré-nominal, de afundamento, pós-nominal e do pulso de término de operação, foram habilitadas as saídas das chaves de 10 entradas que recebem os pulsos de contagem de cada contador de décadas. A carga utilizada para teste foi um transformador monofásico 127/220 V com 250 W de potência nominal ligado à uma lâmpada incandescente de 60 W. Na Tabela 2 são mostrados os testes realizados na fonte implementada, cujos resultados serão mostrados nas Figuras 37 a 42. Nesses testes, houve configuração de diferentes tempos de operação, mas não de amplitude, visto que a fonte geradora de afundamento pode ser alterada externamente.

**Tabela 2 – Testes de afundamentos de tensão de curta duração**

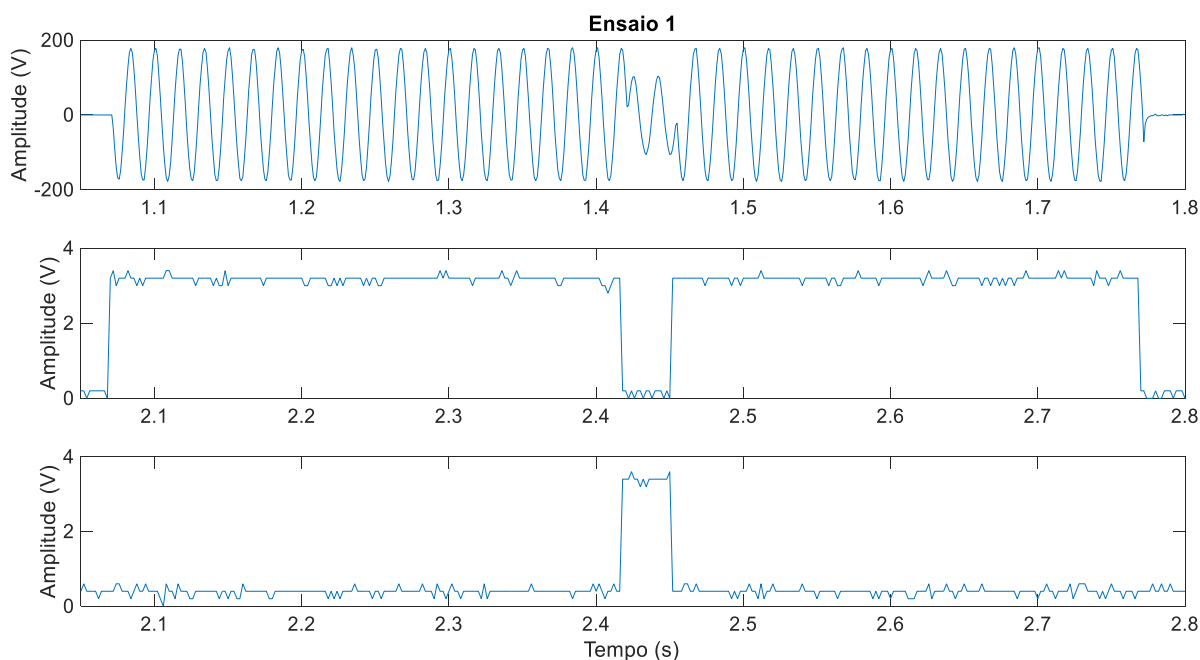
Ensaio	Ciclos			Tensão ( $V_{RMS}$ )		
	Pré afundamento	Afundamento	Pós afundamento	Pré afundamento	Afundamento	Pós afundamento
1	20	2	20	220	127	220
2	100	5	100	220	127	220
3	10	10	10	220	127	220
4	100	50	100	220	127	220
5	50	100	50	220	127	220
6	300	20	300	220	127	220

Fonte: Aatoria Própria, 2018.

Devido a um problema de comunicação entre sinal gerado pelo optoacoplador e os contadores de décadas, não foi possível utilizar isolamento entre a rede e o circuito CC. Outro problema observado foi na operação com carga do gerador de faltas quando este utilizava sinal de sincronismo proveniente da rede elétrica. Ao conectar a carga-teste, a contagem se perdia, fazendo com que os pulsos resultantes fossem diferentes dos pulsos configurados nas chaves seletoras. Como solução aos problemas citados anteriormente, foi utilizado um gerador de sinais RIGOL® DG1022 ligado diretamente à saída do optoacoplador.

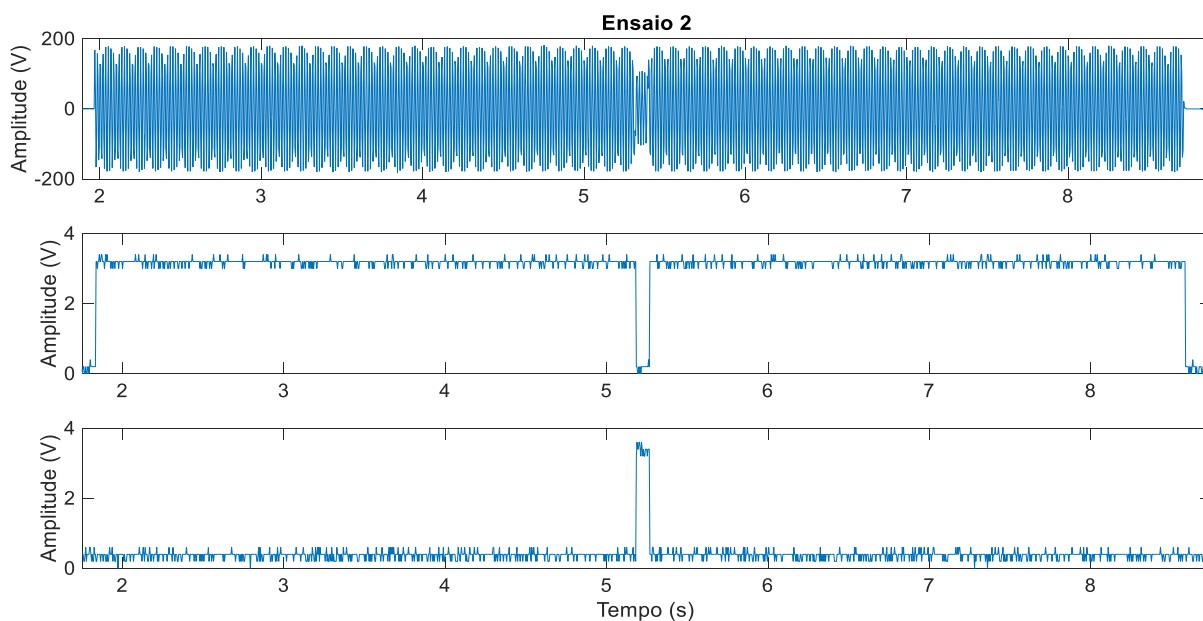
Depois de resolvido os problemas iniciais de montagem, foi realizado a primeira configuração de operação com 20 ciclos de tensão pré e pós nominal com 127 V eficaz, além de 2 ciclos de afundamento de 73 V eficaz.

Na Figura 37 é possível observar a tensão de saída durante todo o evento. Ocorrem 20 ciclos de tensão nominal, antes e depois dos dois ciclos com queda de tensão de 57,73%. O ângulo de partida dos pulsos nominal e de afundamento são justificados pela utilização do gerador de sinais, que encaminha um sinal não invertido para uma porta lógica inversora. Complementarmente, são mostrados os pulsos de controle encaminhados para o sistema de acionamento da carga. É possível constatar que os pulsos ocorreram de forma complementar e duraram aproximadamente 166 ms para os pulsos de ativação da tensão nominal e 34 ms para a ativação do afundamento, com isto, é demonstrado o correto funcionamento do circuito de controle temporal.



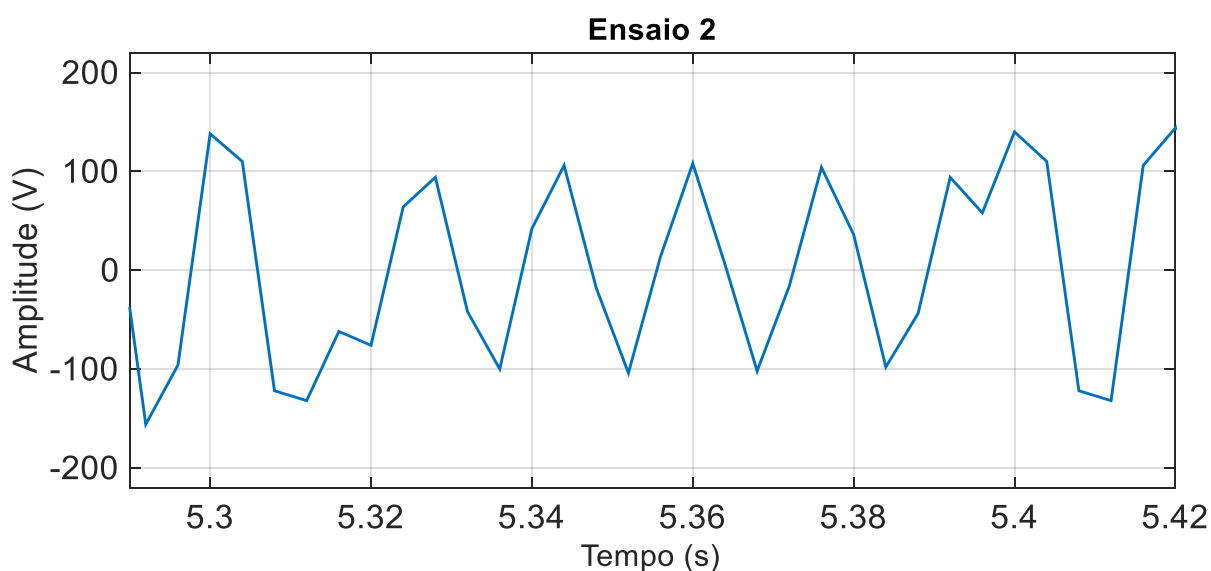
**Figura 37. Tensões na carga, no controle nominal e de afundamento durante o ensaio 1.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

O segundo teste foi realizado com 200 ciclos na tensão pré e pós nominal e cinco ciclos de afundamento de 0.5 p.u. Os períodos de tensão nominal duraram aproximadamente 3,33 s. Já a duração do afundamento foi de 83 ms, que condiz com o ajustado nas chaves de seleção temporal. Pode-se verificar a operação completa da fonte na Figura 38.



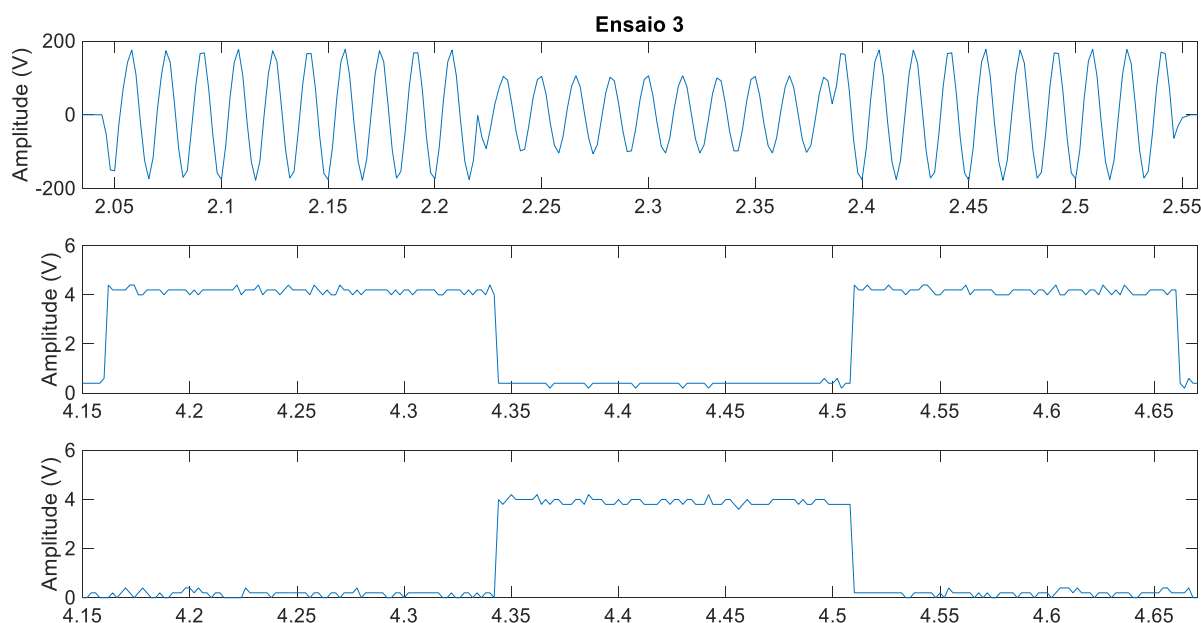
**Figura 38. Tensões na carga, no controle nominal e de afundamento durante o ensaio 2.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

A aparência do sinal está distorcida devido as limitações de medida do osciloscópio, que apresenta 2 bilhões de amostras por segundo, número insuficiente para a correta representação da forma de onda. São mostrados os sinais de controle dos relés para o teste. É possível constatar que o controle da tensão nominal é complementar ao do afundamento e que nunca se ativam ao mesmo tempo. A amplitude deste sinal é inferior à 5 V, mas alta o suficiente para ser percebida pelos relés. Na Figura 39 é mostrada uma ampliação da área do afundamento, para melhor observação dos ciclos ocorridos. As distorções observadas na onda se devem à resolução do osciloscópio, contudo, pode-se observar a correta duração do evento programado.



**Figura 39. Ampliação da região de afundamento do ensaio 2.**  
Fonte: Autoria própria, 2018.

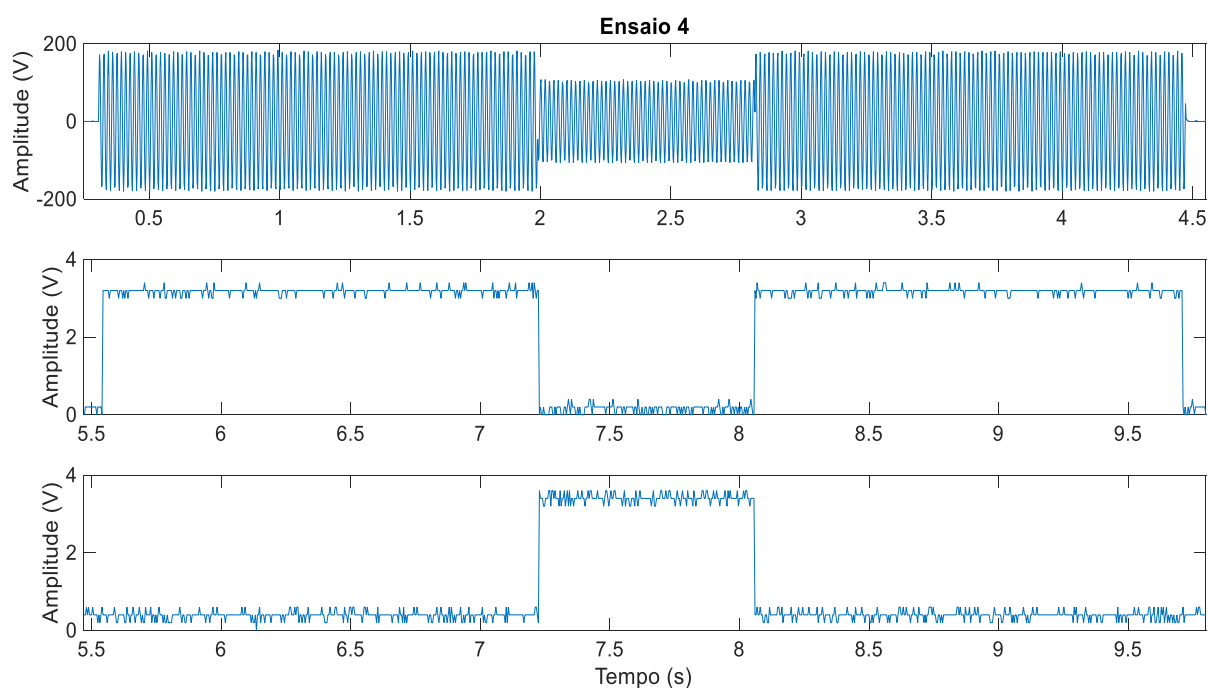
A aparência do sinal está distorcida novamente devido as limitações de medida do osciloscópio. São mostrados os 5 ciclos de afundamento ocorridos no ensaio. O terceiro teste foi realizado com 10 ciclos de tensão de afundamento, pré e pós nominal para comprovar boa operação mesmo com tempos iguais de ativação das chaves. Na Figura 40 é mostrado o resultado de terceiro teste.



**Figura 40. Tensões na carga, no controle nominal e de afundamento durante o ensaio 3.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

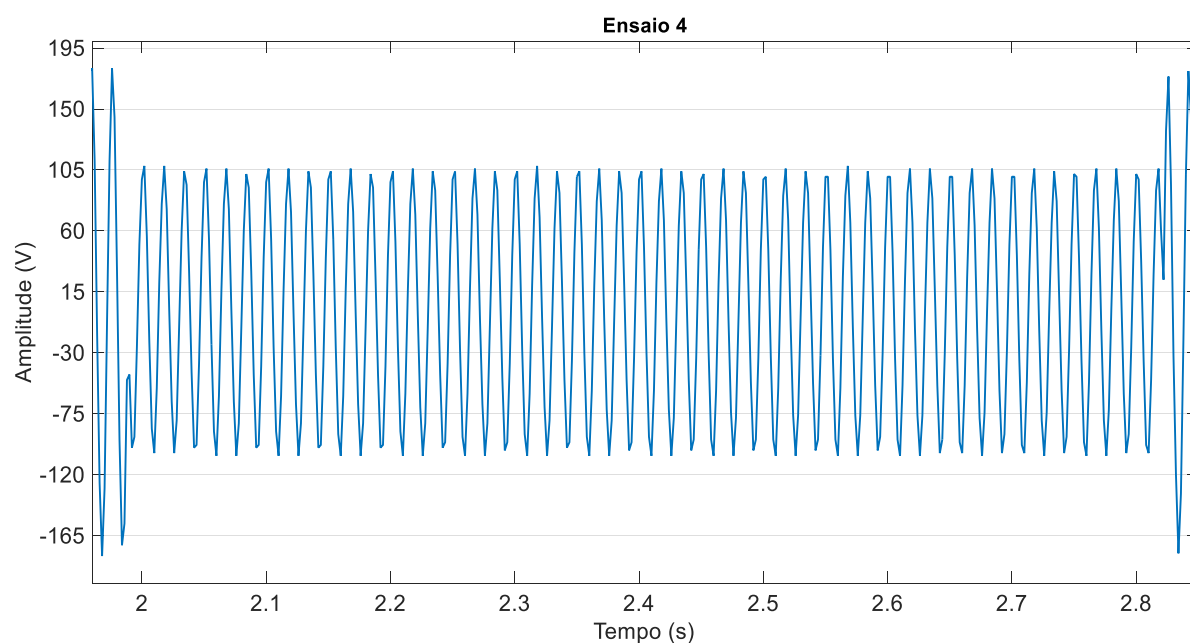
Como observado, os três períodos de operação na saída apresentam duração de aproximadamente 166 ms. Este valor corresponde aos 10 ciclos configurados no circuito de controle de duração para todas as etapas de operação da fonte. Também são observados os pulsos de controle dos relés de acionamento da carga. Como esperado, os tempos ficaram de acordo com o programado.

O quarto teste, realizado na Figura 41, possui 100 ciclos de tensão pré e pós nominal, além de 50 ciclos de afundamento. O tempo estimado para os ciclos nominais foi de 1,667 s e para o ciclo de afundamento foi de 333 ms. São observados os pulsos de controle dos relés de acionamento da carga. O resultado obtido é coerente com a forma de onda desejada para o ensaio. Estes resultados de longa duração mostram que o desempenho dos contadores é suficientemente bom para realizar controles de tempos de curta duração (até 16,67 segundos).



**Figura 41. Tensões na carga, no controle nominal e de afundamento durante o ensaio 4.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

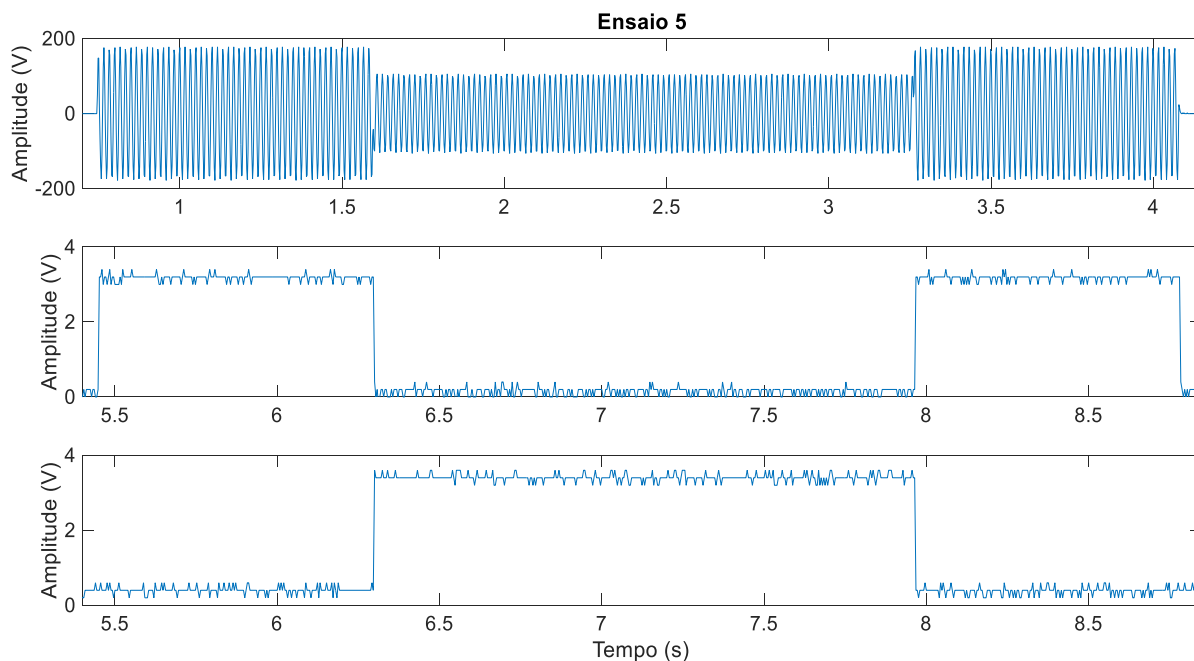
Na Figura 42 é mostrada uma ampliação da região de afundamento. Pode-se observar um comportamento dentro do esperado quanto à transição da tensão nominal para redução de 57,73% em ângulos diferentes de zero graus. Também fica observável a quantidade de 50 ciclos de afundamento.



**Figura 42. Ampliação da região de afundamento do ensaio 4.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

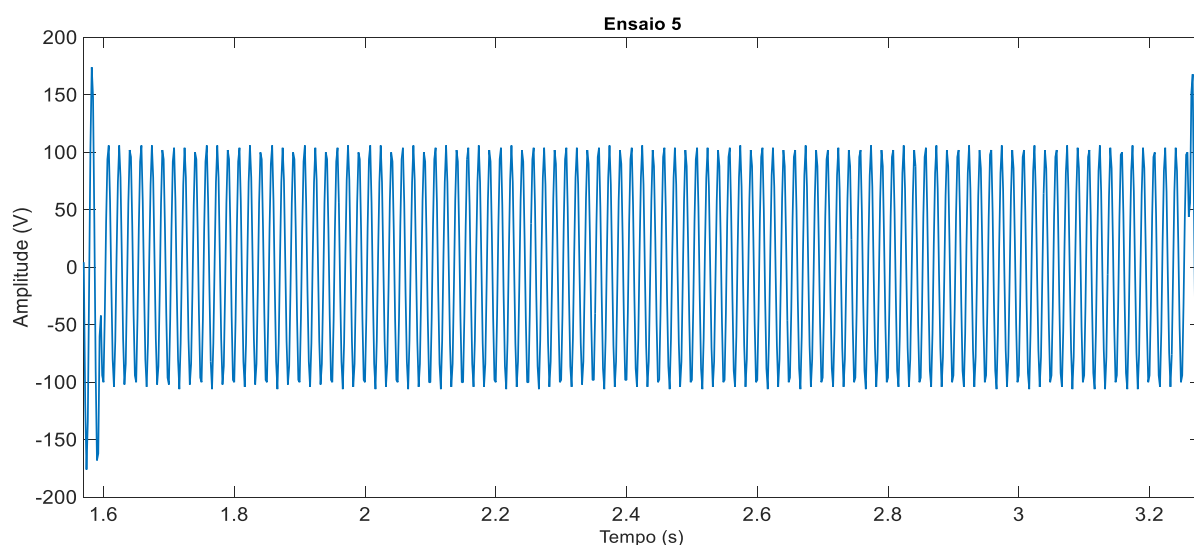


No quinto teste, o gerador foi configurado para gerar 100 ciclos de afundamento e 50 ciclos de tensão pré e pós nominal. Na Figura 43, é mostrado a forma de onda obtida na saída.



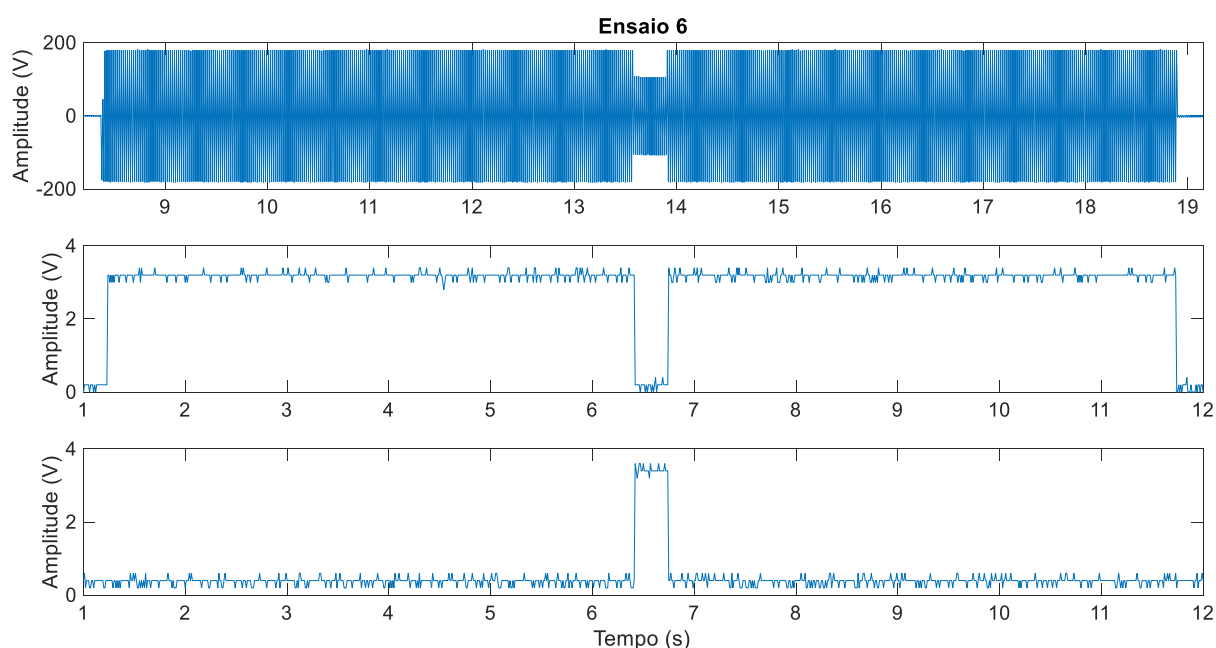
**Figura 43. Tensões na carga, no controle nominal e de afundamento durante o ensaio 5.**  
Fonte: Autoria própria, 2018.

A duração dos ciclos nominais foi de 833 ms e para o ciclo de afundamento foi de 1,667 s. Este valor corresponde a 50 e 100 ciclos respectivamente. Na Figura 44 é realizada uma aproximação do gráfico observado na Figura 43.



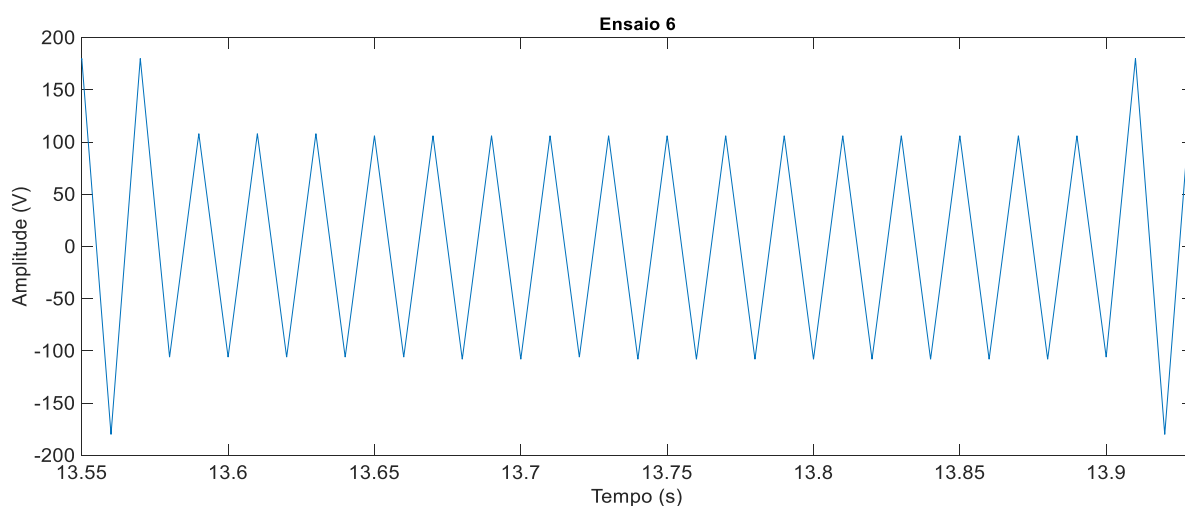
**Figura 44. Ampliação da região de afundamento do ensaio 5.**  
Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Figura 44 é mostrada uma ampliação da região de afundamento do quinto ensaio. O comportamento observado foi típico de um transformador com operação abaixo de sua região de saturação. Também fica observável a quantidade de 100 ciclos de afundamento. Na Figura 45 é mostrado a operação completa da fonte durante o sexto ensaio.



**Figura 45. Tensões na carga, no controle nominal e de afundamento durante o ensaio 6.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

No sexto teste, representado na Figura 45, o gerador foi configurado para gerar 20 ciclos de afundamento e 300 ciclos de tensão pré e pós nominal. A duração dos ciclos nominais foi de 333 ms e para o ciclo de afundamento foi de 5 s. Este valor corresponde a 20 e 300 ciclos respectivamente. Na Figura 46 é mostrada uma ampliação da região de afundamento do quinto ensaio. Pode ser observado a quantidade de 20 ciclos de afundamento.



**Figura 46. Ampliação da região de afundamento do ensaio 6.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Desta forma, foi possível verificar a correta operação do gerador para diferentes durações de falta. Com relação à amplitude, não foram feitas mudanças devido à falta de um autotransformador com relação de transformação variável para realizar os testes. A seguir, no Capítulo 6, serão abordadas as considerações finais sobre o projeto desenvolvido nesta monografia. Além disso, serão definidas sugestões de continuação ou correção do equipamento estudado.

## 6 CONCLUSÕES

Com a crescente demanda por energia elétrica, ocorreram também o aumento na possibilidade de falhas que acarretam em quedas de tensão em partes do conjunto. Em uma rede de distribuição ou transmissão, os parâmetros de operação devem ser cada vez mais confiáveis para garantir qualidade na entrega de energia elétrica (STYVAKTAKIS, BOLLEN & GU, 2001). Condições de operação cada vez mais severas, equipamentos com alta corrente de partida, curto-circuito e condições climáticas adversas são exemplos de dificuldades pelos quais os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica passam (GOIC, MUDNIC & LOVRIK, 2005). Para evitar comportamentos inesperados, torna-se necessário a realização de testes nos equipamentos que apresentam maior sensibilidade com os distúrbios de tensão.

Desta forma, foi feito o desenvolvimento desta monografia, cujo objetivo principal é a realização de testes de afundamentos de tensão de curta duração em um transformador monofásico. Para isto, foi apresentado o desenvolvimento, simulação e implementação de um gerador de defeitos de tensão de curta duração, conforme módulo 8 do PRODIST.

No Capítulo 2 foram realizadas revisões sobre o conceito de distúrbios de tensão de curta duração, suas características principais, seus efeitos mais comuns em componentes elétricos e algumas soluções empregadas para eliminação desses eventos.

A topologia apresentada no Capítulo 3 foi inspirada no circuito proposto por Ma & Karady (2008), que apresentou lógica de fácil entendimento e baixo custo de utilização em comparação com as fontes alternadas programáveis da atualidade. No Capítulo 4 foram mostradas as placas desenvolvidas para os testes práticos. Foram feitas observações sobre alterações necessárias para que a fonte gerasse os afundamentos programados.

Os resultados práticos abordados no Capítulo 5 mostram que, em princípio, é possível controlar o tempo de afundamento utilizando circuitos contadores de décadas. Já na amplitude do afundamento, foi escolhido um nível de 57% em relação à amplitude nominal da carga durante o evento.

Para obtenção dos gráficos obtidos nesta monografia, foi utilizado o conjunto descrito no Capítulo 4, no subcapítulo 4.2 – Conjunto Final de Testes. Na Figura 31 foi mostrada a foto da placa utilizada, que abrange todo o circuito de controle temporal. Para obtenção dos valores de tensão nominal e de afundamento foi utilizada uma bancada monofásica de 127 V<sub>RMS</sub> ligada ao relé de afundamento e um transformador monofásico 127/220 V<sub>RMS</sub>, cujo o terminal primário foi conectado ao relé de tensão nominal. A saída das chaves foi conectada em um transformador monofásico 127/220 V<sub>RMS</sub> de 250 W conectado a uma lâmpada de 127 V<sub>RMS</sub> e 60 W. Um osciloscópio foi utilizado para obtenção das formas de onda dos pulsos de controle dos relés e da tensão no secundário do transformador testado.

Com relação aos problemas observados nos testes práticos, destacam-se três grandes complicações da topologia. Por ser um sistema sincronizado à rede, o circuito apresentou erros de contagem no contador de décadas devido a interferência eletromagnética quando conectado ao transformador testado. Outra questão encontrada foi a incompatibilidade entre o sinal de temporização proveniente do optoacoplador e os contadores de décadas, que produziam contagens incorretas ao serem acoplados com o sistema de isolamento. Por último, foi observado a não sensibilidade do contador com a variação de ciclo de trabalho do circuito de comando, utilizado para gerar variação no ângulo de partida do afundamento.

Entre as melhorias a serem realizadas no gerador, propõem-se o uso de um microcontrolador para configurar os tempos de duração do afundamento, número de ciclos e instante de início do afundamento. Para o circuito de sincronismo com a rede pode-se utilizar o CI TCA785, que é capaz de fazer o controle do ângulo de disparo do afundamento numa faixa de 0 a 180 graus. Com relação à variação de amplitude da tensão durante o evento, recomenda-se a utilização de conversores estáticos de potência controlados por processadores de sinais digitais.

## REFERÊNCIAS

- ALDABÓ, R. (2001). **Qualidade na Energia Elétrica**. São Paulo: Artliber.
- ANEEL. (24 de janeiro de 2018). PRODIST - Módulo 8. Fonte: ANEEL - **Agência Nacional de Energia Elétrica**: <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>
- BOLLEN, M. H. (Julho de 1995). The Influence of Motor Reacceleration on Voltage Sags. (IEEE, Ed.) **IEEE Transactions on Industry Applications**, **31**, pp. **667-674**. doi:10.1109/28.395271
- COLLINS, E., & ZAPARDIEL, F. (7-11 de July de 1997). An Experimental Assessment of AC Contactor Behavior During Voltage Sags. **Proceedings of the IEEE International Symposium on**, p. **6**. doi:10.1109/ISIE.1997.648996
- CONRAD, L., LITTLE, K. & GRIGG, C. (janeiro-fevereiro de 1991). Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips. **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. **27**, no. **1**, (pg. **167-172**)
- DHOKE, S., CHAMAT, S, LANJEWAR, V, TEMBHURNE, P, PARKHEDKAR, P, & PATHAN, N. (3 de Março de 2018). Compensation of Voltage Sag and Voltage Swell by using the power electronic device Dynamic Voltage Restorer (DVR). **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, pg. **2901-2910**.
- GOIC, R., MUDINIC, E. & LOVRIC, M. (27-30 de junho de 2005). Voltage dips influence zone and propagation through the industrial facility. **IEEE Russia Power Tech**. doi: 10.1109/PTC.2005.4524585
- GOMEZ, J., MORCOS, M., REINER, C., & CAMPETELLI, G. (7 de agosto de 2002). Behavior of Induction Motor Due to Voltage Sags and Short Interruptions. **IEEE Transactions on Power Delivery** (2), pp. **430-440**. doi:10.1109/61.997914
- HAMOUD, F., DOUMBIA, M. L., & CHÉRITI, A. (2017). Voltage sag and swell mitigation using D-STATCOM in renewable energy based distributed generation systems. **Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2017 Twelfth International Conference on** (p. **6**). Monte Carlo: IEEE. doi:10.1109/EVER.2017.7935917
- HINGORANI, H. (junho de 1995) Introducing custom power. **IEEE Spectrum**, vol. **32**, no. **6**, (pg. **41-48**).

HOROWITZ, S. H., PHADKE, A. G., & LEYMAN, B. (2017). Power system relaying. Research Studies Press and John Wiley, **Somerset, UK. (1992).**

HU, W., SU, C., FANG, J. & CHEN, Z. (10-13 Novembro 2013). Comparison study of power system small signal stability improvement using SSSC and STATCOM. **IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.** doi: 10.1109/IECON.2013.6699438

IOSKEA. Diagrama de Gantt. Kioskea.net, 2011. Disponível em: <<http://pt.kioskea.net/contents/projet/gantt.php3>>. Acesso em: 07 Mar. 2011.

JEONG, S. W., LEE, G. J., & GIM, J. (26-30 de Outubro de 2009). The study on the characteristics of operating limits of AC contactor during voltage sag. **Em IEEE (Ed.), Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, (p. 4). Seoul.** doi:10.1109/TD-ASIA.2009.5356981

JOSE, R. & RAMTEKE, M. (21-23 de dezembro de 2017). Mitigation of problems in distribution line due to nonlinear and unbalanced load using STATCOM. **Em IEEE (Ed.), 2017 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), Kollam, India.** doi:10.1109/TAPENERGY.2017.8397208

KUSKO, A., & THOMPSON, M. T. (2007). **Power Quality in Electrical Systems.** New York, United States of America: Mac Graw Hill.

LEIRIA, A., NUNES, P., MORCHED, A. & BARROS, M. T. C. (8 de fevereiro de 2006). Induction motor response to voltage dips: **Published by Elsevier B.V. (2006).** doi:10.1016/j.epsr.2005.12.013

MA, Y., & KARADY, G. G. (21-24 DE APRIL DE 2008). A Single-Phase Voltage Sag Generator for Testing Electrical Equipment. **Transmission and Distribution Conference and Exposition (p. 5).** Chicago: IEEE.

PATEL, D., GOSWAMI, A. K., & SINGH, S. K. (3 de março de 2015). Voltage sag mitigation in an Indian distribution system using dynamic voltage restorer. Em Elsevier (Ed.), **International Journal of Electrical Power & Energy Systems, (p. 231-241).** Índia. doi:10.1109/ICHQP.2002.1221497

PEDRA, J., CORCOLES, F., & SAINZ, L. (6-9 de outubro de 2002). **Study of AC contactors during voltage sags.** Em IEEE (Ed.), **10th International Conference on, (p. 6).** Rio de Janeiro. doi:10.1109/ICHQP.2002.1221497

PEREIRA, R. M. M., FERREIRA, C. M. M. & BARBOSA, F. P. M. (27 fevereiro 2014). Comparative study of STATCOM and SVC performance on Dynamic Voltage Collapse of an Electric Power System with Wind Generation. **Em IEEE (Ed.), 1 IEEE Latin America Transactions, (p. 6). Rio de Janeiro.** doi:10.1109/ICHQP.2002.1221497

RAMESH, K.S., RITESH, K., VENMATHI, M. & RAMESH, L. (2010). Analysis of voltage sag with different DG for various faulty conditions, in: **Proceedings of the International Joint Journal Conference on Engineering and Technology (IJJCET).**

RENDERS\_1, B., RYCKAERT, W. R., DE GUSSEMÉ, K., STOCKMAN, K., & VANDEVELDE, L. (julho de 2007). Improving the voltage dip immunity of converter-connected distributed generation units. **Renewable Energy 33 ,2008 (p. 1011 - 1018).** ELSEVIER.

RENDERS\_2, B., DE GUSSEMÉ, RYCKAERT, W. R., K., STOCKMAN, K., VANDEVELDE, L & BOLLEN, M. H. J. (julho de 2008). Distributed generation for mitigating voltage dips in low-voltage distribution grids. **IEEE Transactions on Power Delivery 23 (p. 1581- 1588).**

RONAN, E. R., SUDHOFF, S. F., GLOVER, D. L., & GALLOWAY. (2002). A power electronic-based distribution transformer. **IEEE Trans. Power Deliv. 17 (p. 537 - 543).**

SENGUL, M., (12 de março de 2013). E The effects of the voltage recovery after the voltage sag on gas discharge lamps. **Electric Power Systems Research (p. 309- 321).** ELSEVIER.

SILVA, M. F., CHAGAS, N. B., SCHLITTLER, M. E., FRAYTAG, J., MARCHESAN, T. B., BISOGNO, F. E., ALONSO, J. M. & PRADO, R. N. (julho de 2013). Electric Equivalent Model for Induction Electrodeless Fluorescent Lamps. **IEEE Transactions on Power Electronics ( Volume: 28, Issue: 7, July 2013 ) (p. 3603 - 3613).** IEEE. doi: 10.1109/TPEL.2012.2227501

SMITH, K. S., RAN, L., & LEYMAN, B. (Janeiro de 1999). Analysis of transformer inrush transients in offshore electrical systems. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution (p. 89 - 95).** IEEE. doi: 10.1049/ip-gtd:19990056

SURISUNTHON, S., & TAYJASANANT, T. (21-24 de Novembro de 2011). Impacts of distributed generation's locations, sizes, operation modes and transformer connections on voltage sag assessment. **TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference (p. 5).** Bali: IEEE. doi:10.1109/TENCON.2011.6129239



STYVAKTAKIS, E., & BOLLEN, M. H. J., & GU, I. Y. H. (1-4 de Outubro de 2000). Classification of power system events: voltage dips. **Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings**. Orlando: IEEE. doi: 10.1109/ICHQP.2000.897771

STYVAKTAKIS, E., & BOLLEN, M. H. J., & GU, I. Y. H. (15-19 de Julho de 2001). Expert system for voltage dip classification and analysis. **Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings**. Orlando: IEEE. doi: 10.1109/PESS.2001.970122

TANG, L., LAMOREE, J., MACGRANAGHAN, M., & MEHTA, H. (10-15 de Abril de 1994). Distribution System Voltage Sags: Interactions with **Motor and Drive Loads. Transmission and Distribution Conference (p. 6)**. Chicago: IEEE.

WAD, G. V., & JAWALE, S. D. (2016). Simulation model of three phase dynamic voltage restorer for voltage compensation. **Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), International Conference on (p. 5)**. Bhopal: IEEE. doi:10.1109/ICEPES.2016.7915930

WANG\_1, D., MAO, C. X., LU, J. M. & FAN, S. (2005). Electronic power transformer-based power quality control method, **High Volt. High Volt. Eng. 31 (p. 63-65)**.

WANG\_2, D., MAO, C. X., LU, J. M., FAN, S. & PENG, F. Z. (2007). Theory and application of distribution electronic power transformer, **Electric. Electric. Power Syst. Res 77 (p. 219-226)**.

WANG\_3, D., MAO, C. X. & LU (2008). Coordinated control of EPT and generator excitation system for multidouble-circuit transmission-lines system. **IEEE Trans. Power Deliv. 23 (p. 371-379)**.

ZHANG, L. & BOLLEN, M. H. J. (2000). Characteristic of voltage dips (sags) in power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 2, April 2000, (pg. 827-832)**.

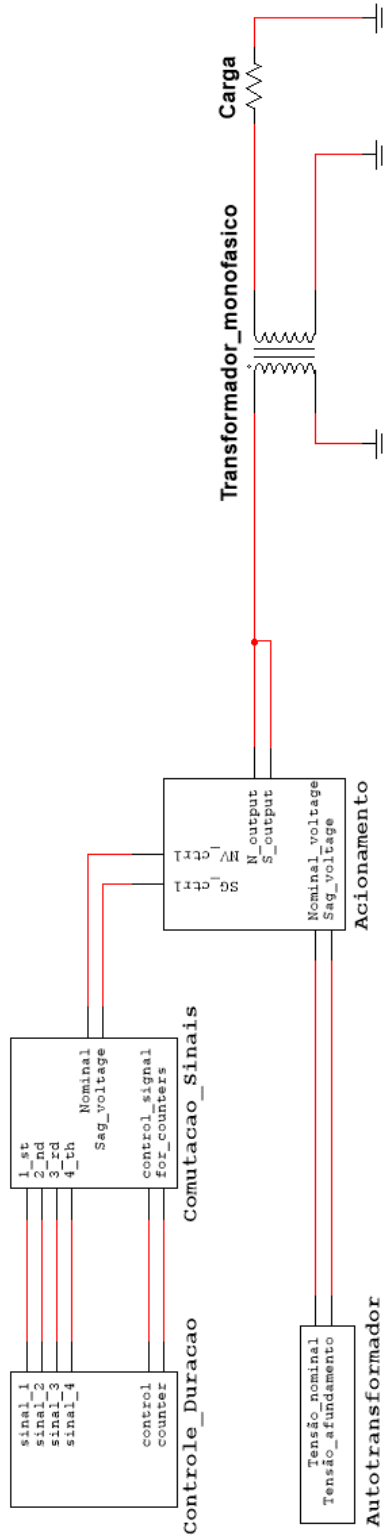
## APÊNDICE A – OPERAÇÃO DA FONTE CONTROLADA



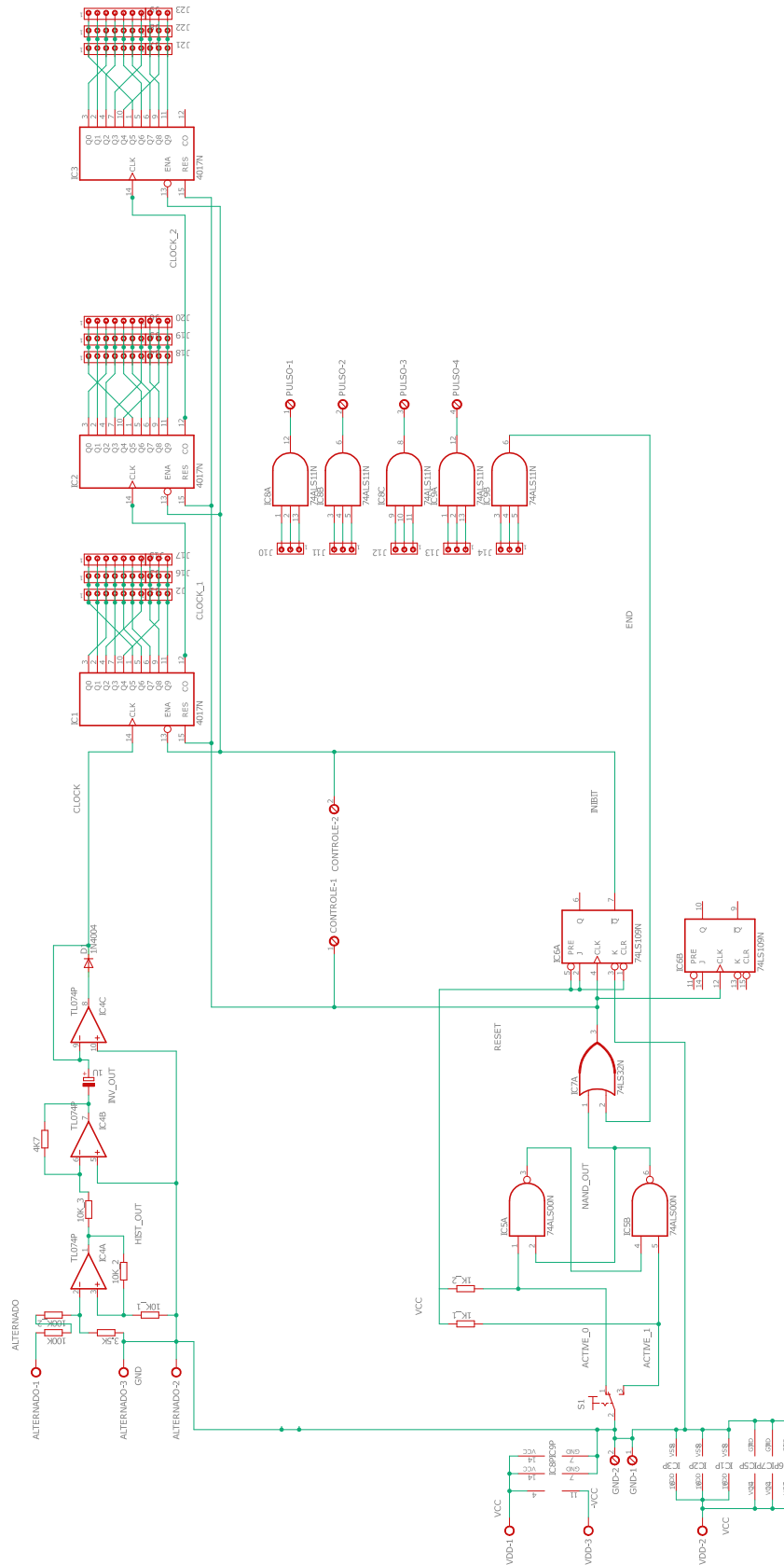
#### Etapas de operação da fonte:

- Realizar a programação da fonte selecionando as saídas dos contadores responsáveis por gerar o pulso de controle temporal no ciclo desejado;
- Pressionada a chave alavanca da fonte, os pulsos de controle mudam de estado;
- Com a alteração de nível lógico dos pulsos de controle, os três contadores começam a realizar a contagem a partir de um sinal de temporização de 60 Hz;
- Este sinal de temporização é proveniente de um comparador responsável por sincronizar a operação da fonte com o sinal da rede;
- São selecionados quatro pulsos de controle da operação da fonte e um último pulso de término de contagem, que é responsável por evitar contagens sucessivas e errôneas;
- Os pulsos de controle de operação são somados e servem de temporização das etapas de ativação dos relés de acionamento do transformador a ser testado;
- Cada um dos relés é responsável por gerenciar um nível de tensão, o primeiro controla a tensão nominal e recebe os quatro pulsos de contagem. Já o segundo é responsável por inserir o distúrbio de tensão de curta duração (afundamento, elevação e interrupção);
- As saídas dos dois relés estão conectadas no primário do transformador a ser testado;
- Ao realizar a operação programada, o controle de operação dos contadores recebe o pulso de término de operação (quinto pulso estabelecido pelo operador) que alterna o estado dos sinais de controle dos contadores de forma a parar a contagem.

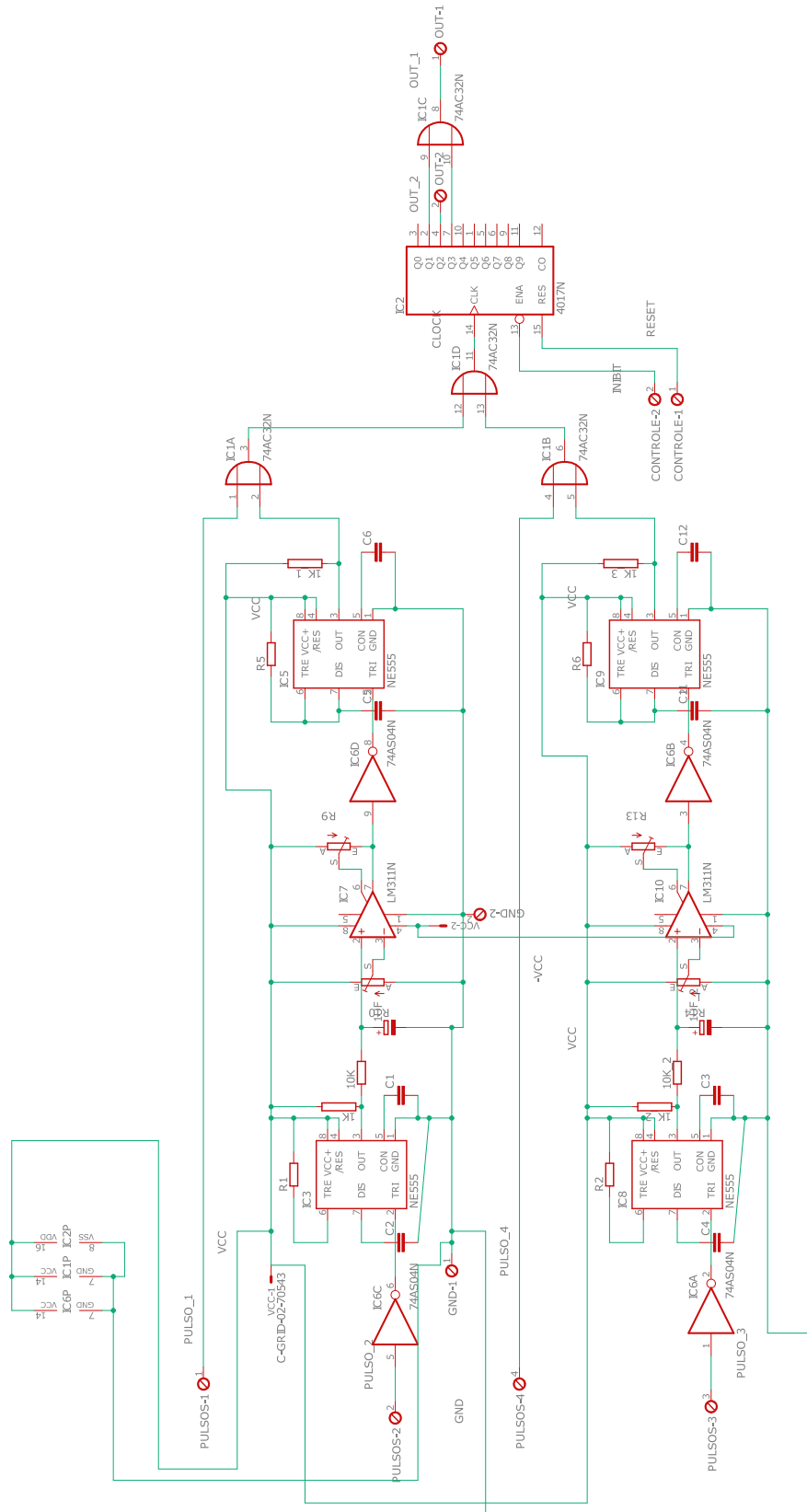
## APÊNDICE B – DIAGRAMA ELÉTRICO COMPLETO



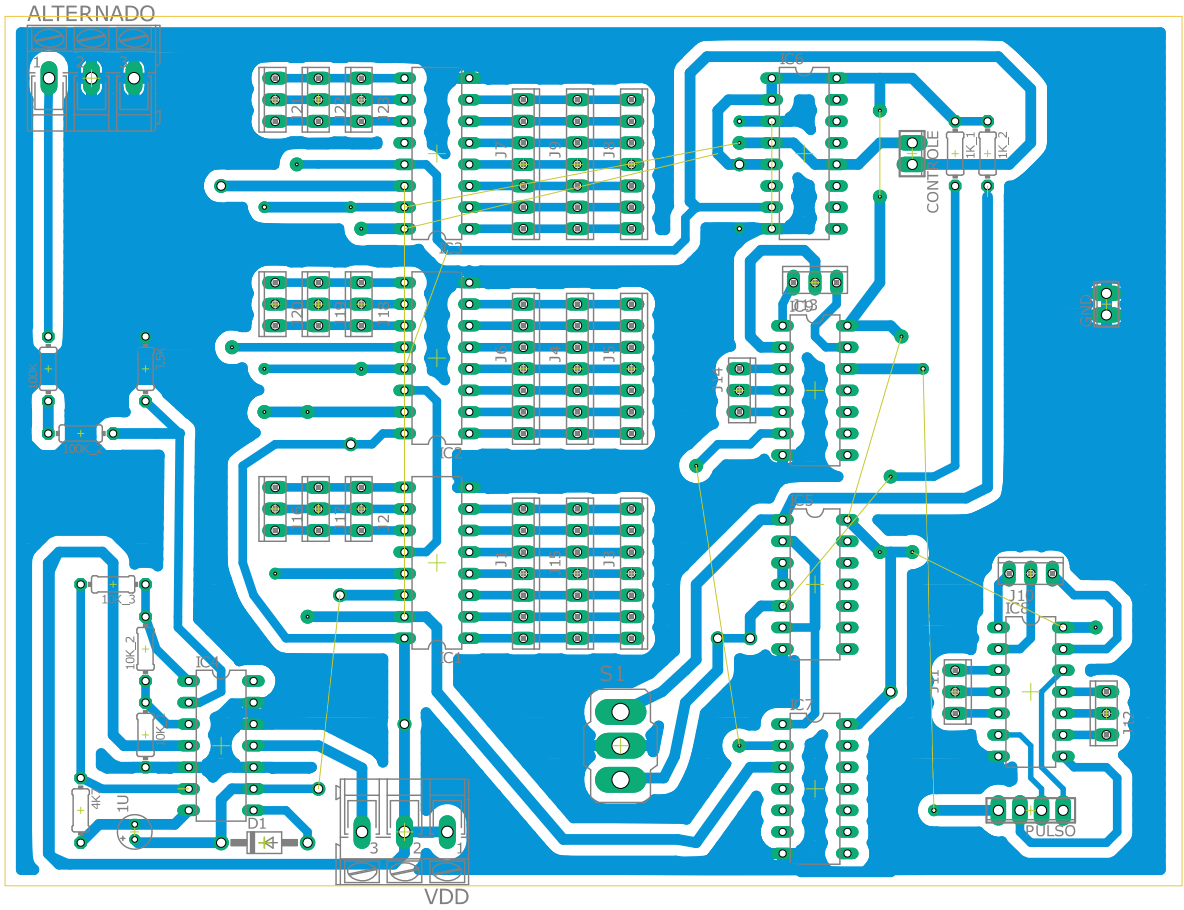
# APÊNDICE C – DIAGRAMA ELÉTRICO MÓDULO DE CONTROLE DE DURAÇÃO



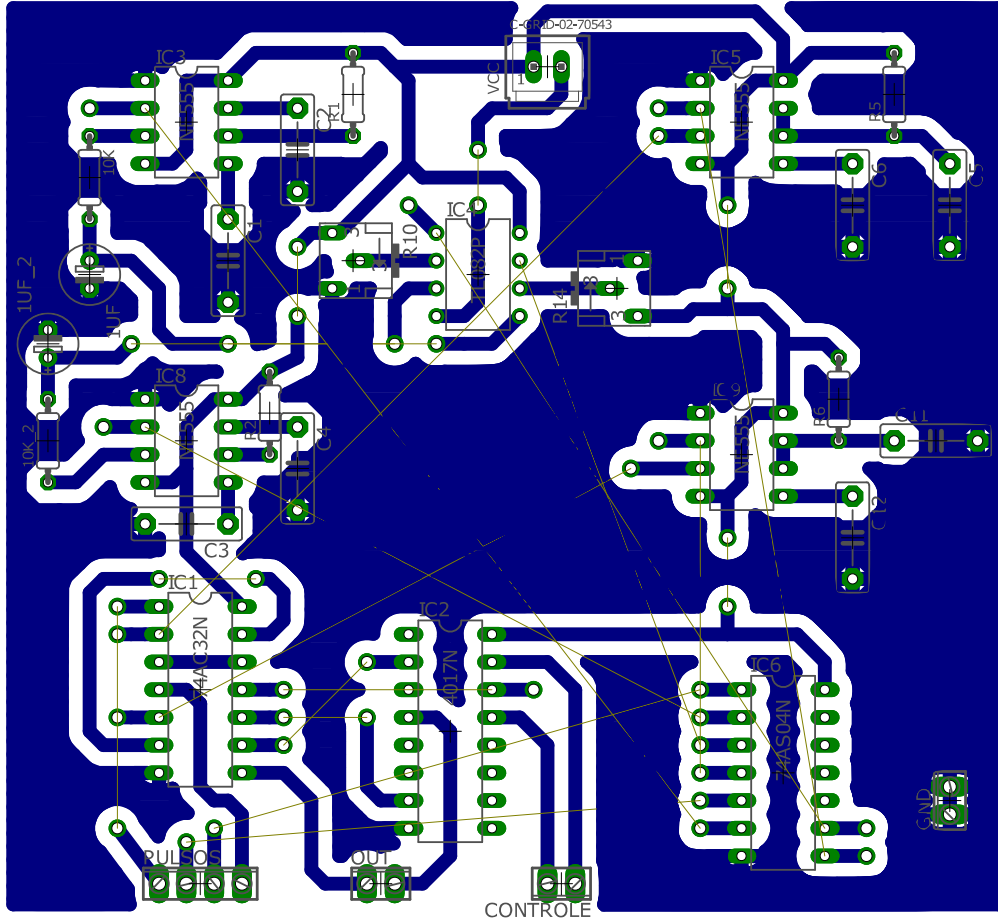
# APÊNDICE D – DIAGRAMA ELÉTRICO MÓDULO DE COMUTAÇÃO DE SINAIS



# APÊNDICE E – PLACA DE CONTROLE DE DURAÇÃO

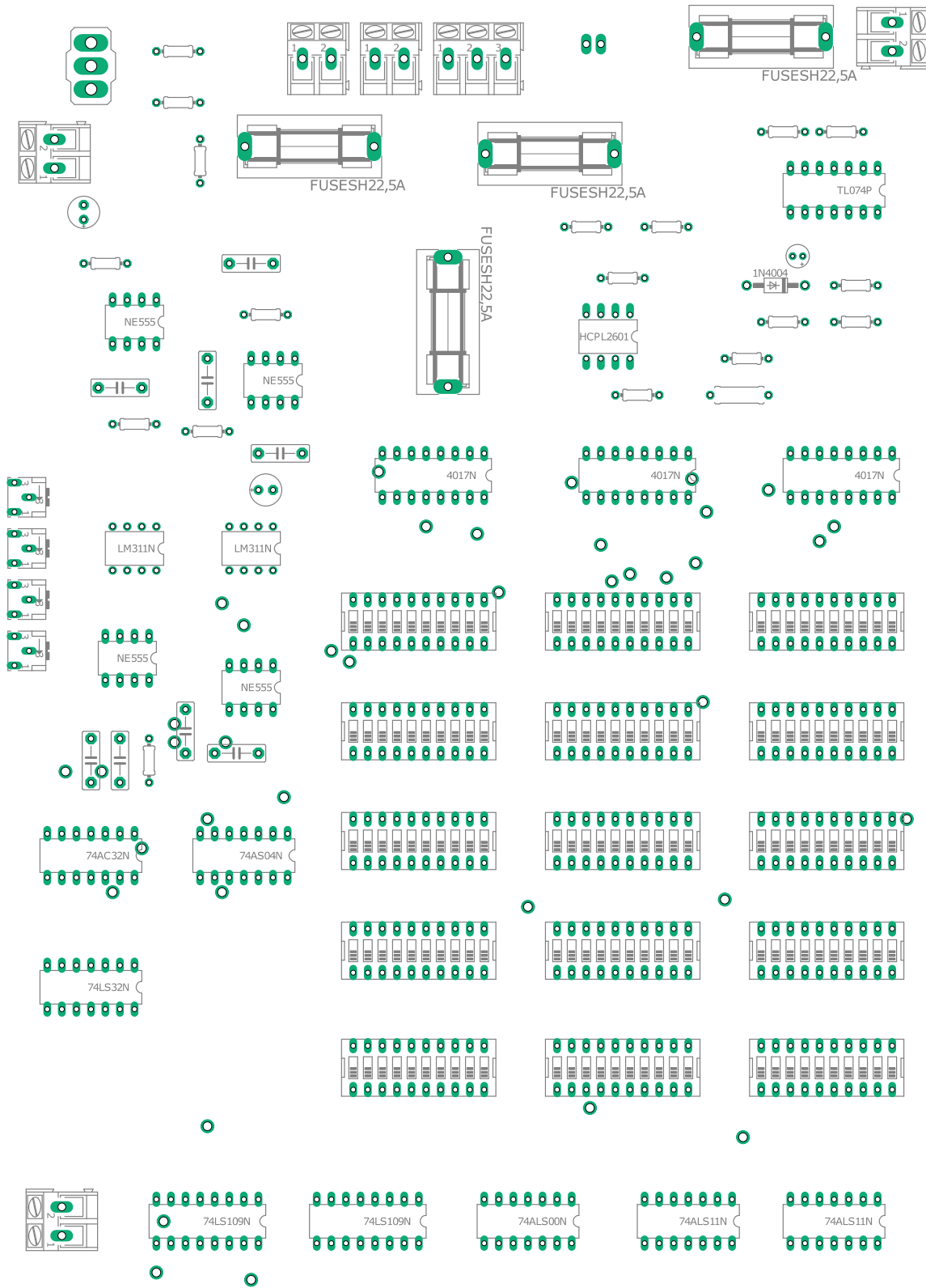


# APÊNDICE F – PLACA DE COMUTAÇÃO DE SINAIS

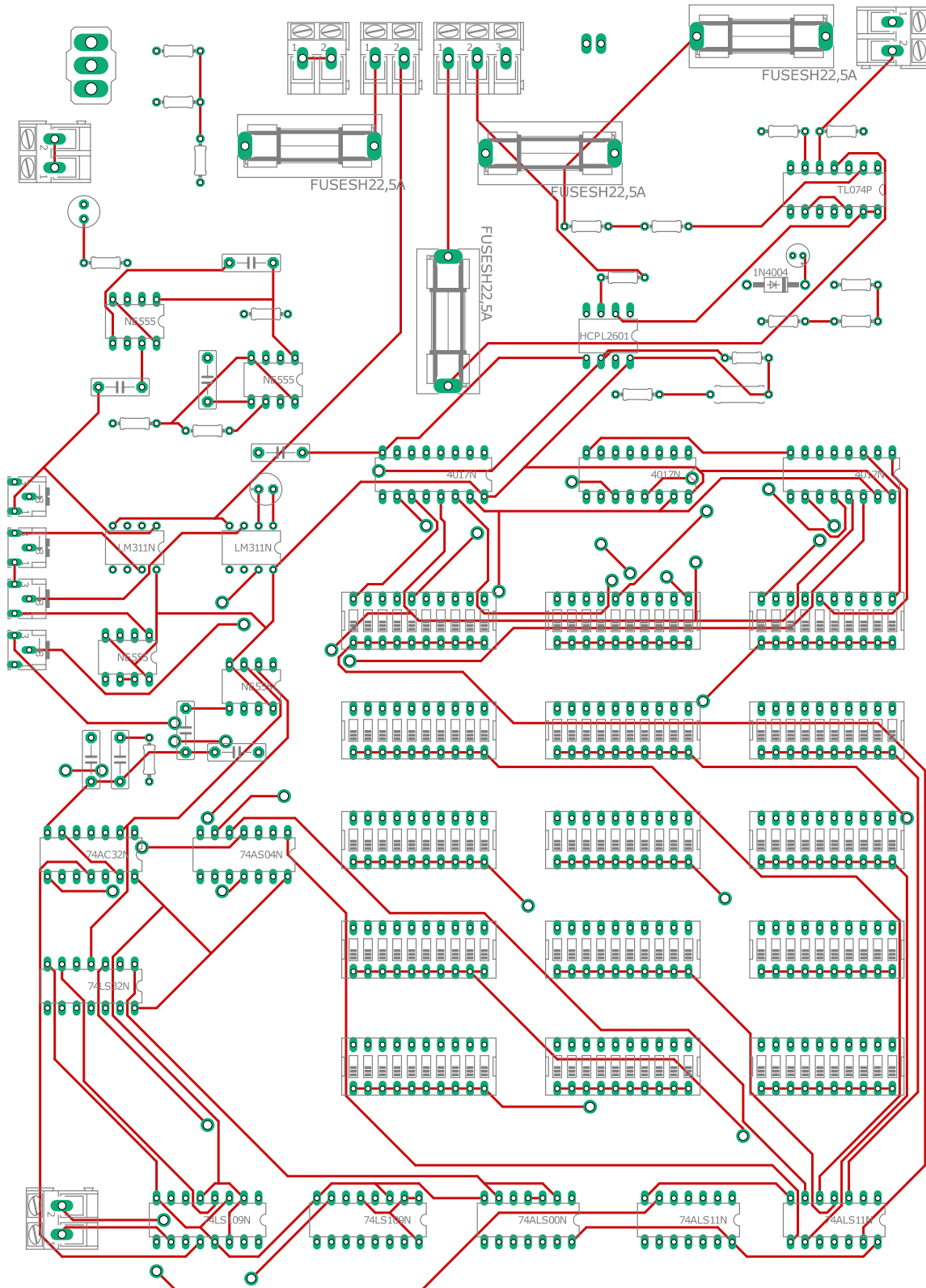




# APÊNDICE G – COMPONENTES PLACA FINAL



### APÊNDICE H – TRILHAS DA FACE SUPERIOR DA PLACA FINAL



# APÊNDICE I – TRILHAS DA FACE INFERIOR DA PLACA FINAL

