ESTUDOS E IMPLEMENTAÇÕES DE TOPOLOGIAS DE RESTAURADORES DINÂMICOS DE TENSÃO

Isidoro Campos Raposo de Almeida Filho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

_____

Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.

_____

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.

_____

Prof. José Luiz da Silva Neto, Ph. D.

_____

Profª. Maria Dias Bellar, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2007

ALMEIDA FILHO, ISIDORO CAMPOS RAPOSO
Estudos e Implementações de Topologias de
Restauradores Dinâmicos de Tensão [Rio de Janeiro] 2007
XI, 96 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Elétrica, 2007)
Dissertação – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE
1. Compensador Série
2. Restaurador Dinâmico de Tensão
3. Afundamento de Tensão
4. Compensador Série de Baixo Custo
5. Equipamentos *Custom Power*
I. COPPE/UFRJ II. Título ( série )

# AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a toda minha família pelo apoio e confiança. Especialmente, dedico este trabalho a minha mãe, meu pai e meus irmãos que me deram muito carinho e suporte, fatores essenciais para a conclusão deste.

Agradeço também à minha esposa Nathalia que teve toda paciência do mundo, ou melhor, quase toda nos momentos de estresse.

Agradeço ao amigo e professor Maurício Aredes do Laboratório de Eletrônica de Potência por me incentivar a trabalhar nesta nova área e pela sua dedicada orientação neste trabalho, não se esquecendo dos imperdíveis momentos de descontração.

Com certeza, a FAMÍLIA ELEPOT foi fundamental para a conclusão deste trabalho, fornecendo milagrosos esclarecimentos e todo o apoio necessário.

Agradeço muito a DEUS por me permitir cumprir mais uma etapa na vida, sempre iluminando o meu caminho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDOS E IMPLEMETAÇÕES DE TOPOLOGIAS DE RESTAURADORES DINÂMICOS DE TENSÃO

Isidoro Campos Raposo de Almeida Filho

Julho / 2007

Orientador: Mauricio Aredes

Programa: Engenharia Elétrica

Neste trabalho são abordadas duas topologias de compensadores série com fonte auxiliar de energia ativa. A topologia básica de um Restaurador Dinâmico de Tensão (RDT) é apresentada, citando-se cada um de seus componentes e seu funcionamento, assim como as características especiais deste compensador série. Também foi desenvolvida a modelagem e estudos de uma segunda topologia chamada de Restaurador Dinâmico de Tensão Invertido (RDTI), diferenciando-se da tradicional na posição da ponte a diodos com relação ao transformador série. Foi proposto um algoritmo de controle simplificado, que apresentou excelentes resultados.

Além das topologias citadas também é abordada uma terceira na qual não há fonte auxiliar de energia ativa. Esta foi chamada de Restaurador Dinâmico de Tensão *Sag–Sweel* (RDTSS) que não apresenta a ponte a diodos como suprimento de energia.

A análise é ilustrada, primeiramente, a partir da simulação digital no programa PSCAD/EMTDC V.4.0.1. Em seguida, também serão avaliados sob condições reais de operação ambos os protótipos laboratoriais de baixa tensão do RDT e do RDTI. Dessa forma, são investigados os seus respectivos desempenhos, assim como, algumas vantagens e desvantagens de cada topologia.

Os resultados obtidos a partir desta dissertação foram suficientes para realizar um estudo detalhado do funcionamento destas topologias. Ambos apresentaram alta robustez e flexibilidade de operação.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDIES AND IMPLEMENTATION OF DYNAMIC VOLTAGE REGULATORS

Isidoro Campos Raposo de Almeida Filho

July / 2007

Advisor: Mauricio Aredes

Department: Electrical Engineering

This work presents two topologies of series compensators with auxiliary source of active power. A basic topology of a Dynamic Voltage Regulator (DVR) is presented, with each one of its components and functionality, as well as the special characteristics of this series compensator. The modeling and studies of a second topology, called the Inverted Dynamic Voltage Regulator (DVRI), different from the traditional one by replacing the diode bridge on the load side of the series transformer. A simplified control method was developed and presented excellent results.

Beyond these topologies, a third one, in which there is no diode bridge as an auxiliary active power source. It was called Sag-Swell Dynamic Voltage Regulator (DVRSS).

Firstly, the proposed topologies are analysed in the digital simulation program PSCAD/EMTDC V.4.0.1. Then, the experimental prototypes of the DVR and the DVRI are evaluated under real operational conditions. Their performances, as well as some advantages and disadvantages of each topology are discussed.

This work has shown the robustness and flexibility of operation of the proposed topologies. Finally, it is concluded that the Topologies of the DVRI and the DVRSS are feasible and adequate for mitigating voltage disturbances and can compensate voltage imbalances, as well as harmonics.

# SUMÁRIO

**LISTA DE FIGURAS** ..... **VIII**

**LISTA DE TABELAS** ..... **XI**

**CAPÍTULO 1** **INTRODUÇÃO** ..... **1**

1.1 MOTIVAÇÃO ..... 2
1.2 OBJETIVOS ..... 2
1.3 SUMÁRIO ..... 3

**CAPÍTULO 2** **PRINCÍPIOS BÁSICOS DA QUALIDADE DE ENERGIA** ..... **4**

2.1 NORMAS E REGULAMENTAÇÕES ..... 5
2.2 PRINCIPAIS DEFINIÇÕES E TERMOS TÉCNICOS ..... 6
2.3 PROBLEMAS TÍPICOS DE QEE ..... 8
2.4 ESTADO DA ARTE DE COMPENSADORES DE TENSÃO ..... 11
2.5 EXEMPLOS DE TOPOLOGIAS DE COMPENSADORES DE TENSÃO ..... 13
2.6 CONCLUSÕES PARCIAIS ..... 17

**CAPÍTULO 3** **TOPOLOGIAS COM FONTE AUXILIAR DE ENERGIA ATIVA** ..... **18**

3.1 CIRCUITO DE POTÊNCIA ..... 19
3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E OPERAÇÃO ..... 24
3.3 ANÁLISE PRELIMINAR DAS TOPOLOGIAS ..... 28
3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS: ..... 31

**CAPÍTULO 4** **CONTROLE DAS TOPOLOGIAS RDT E RDTI** ..... **32**

4.1 CONTROLE INICIAL ..... 32
4.2 CONTROLE OTIMIZADO ..... 39
4.3 SIMULAÇÃO DAS TOPOLOGIAS ..... 41
4.3.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES ..... 48
4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS ..... 58

**CAPÍTULO 5** **TOPOLOGIA SEM FONTE AUXILIAR DE ENERGIA ATIVA** ..... **59**

5.1 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO RDTSS ..... 60
5.2 CONTROLE DO RDTSS ..... 63
5.3 SIMULAÇÃO DAS TOPOLOGIAS ..... 65
5.3.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO ..... 66

5.4 CONCLUSÕES PARCIAIS ..... 75

**CAPÍTULO 6 ANÁLISE OPERACIONAL DOS PROTÓTIPOS DO RDT E DO RDTI ..... 76**

6.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO RDT E DO RDTI ..... 79

6.1.1 O RDT ..... 79

6.1.2 O RDTI ..... 84

6.2 CONCLUSÕES PARCIAIS ..... 89

**CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS ..... 91**

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 93**

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – TERMOS TÉCNICOS ASSOCIADAS À QUALIDADE DE ENERGIA. ..... 6
FIGURA 2 – REGULADORES DE TENSÃO: (A) COM COMUTADORES MECÂNICOS DE TAPS E (B) COM COMUTADORES ELETRÔNICOS DE TAPS A TIRISTOR. ..... 13
FIGURA 3 – REGULAÇÃO DE TENSÃO ATRAVÉS DE BANCOS DE CAPACITORES. ..... 14
FIGURA 4 – TOPOLOGIA DE UM UPS (*UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY)*. ..... 15
FIGURA 5 – TOPOLOGIA DO STATCOM (*STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR*). ..... 15
FIGURA 6 – COMPENSADOR SÉRIE RDT ASSOCIADO A UMA FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA. ..... 16
FIGURA 7 – REGULADOR SÉRIE DE TENSÃO: TOPOLOGIA DE UM RDT. ..... 17
FIGURA 8 – TOPOLOGIAS DE COMPENSADORES SÉRIE UTILIZANDO PONTE COMPLETA A DIODOS COMO FONTE DE SUPRIMENTO DE ENERGIA ATIVA: (A) RDT E (B) RDTI. ..... 19
FIGURA 9 – RETIFICADOR TRIFÁSICO EM PONTE NÃO CONTROLADO. ..... 20
FIGURA 10 – INVERSOR TRIFÁSICO EM PONTE. ..... 21
FIGURA 11 – TOPOLOGIA DO FILTRO RLC PASSA - BAIXAS. ..... 23
FIGURA 12 – MODELAGEM DO TRANSFORMADOR SÉRIE**.** ..... 24
FIGURA 13 – OPERAÇÃO DE UM RDT EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO FRENTE A UMA FALTA. ..... 25
FIGURA 14 – DIAGRAMA FASORIAL DO FUNCIONAMENTO DO RDT. ..... 26
FIGURA 15 – DIAGRAMA DO CIRCUITO DE POTÊNCIA COM OS BLOCOS DE MEDIÇÃO E CONTROLE DO RDT. ..... 27
FIGURA 16 – CIRCULAÇÃO DE POTÊNCIA NO RDT E NO RDTI. ..... 28
FIGURA 17– CIRCULAÇÃO INTERNA DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA NO RDTI. ..... 29
FIGURA 18 – DIAGRAMA DO ALGORITMO DE CONTROLE IMPLEMENTADO INICIALMENTE. ..... 33
FIGURA 19 – DIAGRAMA DETALHADO DOS BLOCOS DO ALGORITMO INICIAL DE CONTROLE. ..... 35
FIGURA 20 – DIAGRAMA BÁSICO DO PLL. ..... 35
FIGURA 21 – ALGORITMO DO PLL BASEADO NA TEORIA PQ. ..... 36
FIGURA 22 – FORMAS DE ONDA DA TENSÃO DE ENTRADA E A REFERÊNCIA DE SAÍDA DO PLL. ..... 37
FIGURA 23 – ALGORITMO DO DETECTOR DE SEQÜÊNCIA POSITIVA. ..... 38
FIGURA 24 – ALGORITMO DO PLL TRIFÁSICO. ..... 40
FIGURA 25 – ALGORITMO DE CONTROLE SIMPLIFICADO PROPOSTO. ..... 41
FIGURA 26 – DIAGRAMA DO CIRCUITO DE POTÊNCIA SIMULADO: RDT E RDTI. ..... 43
FIGURA 27 – DIAGRAMA TRIFILAR DOS EQUIPAMENTOS: (A) RDT E (B) RDTI. ..... 45
FIGURA 28 – DIAGRAMA DE MEDIÇÃO E NORMALIZAÇÃO DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS: (A) TENSÕES DA BARRA DE ENTRADA E (B) TENSÕES DA BARRA REGULADA. ..... 46
FIGURA 29 – DIAGRAMA DE SINCRONISMO E CÁLCULO DA TENSÃO DE REFERÊNCIA. ..... 47
FIGURA 30 – DIAGRAMA DE CONTROLE: CÁLCULO DAS TENSÕES DE REFERÊNCIA PARA O CHAVEAMENTO. ..... 48
FIGURA 31 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN}$, TENSÃO DE REFERÊNCIA DE COMPENSAÇÃO $V_{REF_COMP}$ E TENSÃO APLICADA NO TRANSFORMADOR SÉRIE $V_{ABC_TRAFO}$: (A) RDT E (B) RDTI. ..... 49
FIGURA 32 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN}$ E A TENSÃO REGULADA NA CARGA $V_{ABC_REG}$: (A) RDT E (B) RDTI. ..... 50
FIGURA 33 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN}$, TENSÃO DE REFERÊNCIA DE COMPENSAÇÃO $V_{REF_COMP}$ E TENSÃO APLICADA NO TRANSFORMADOR SÉRIE $V_{ABC_TRAFO}$: (A) RDT E (B) RDTI. ..... 52
FIGURA 34 TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN}$ E A TENSÃO REGULADA NA CARGA $V_{ABC_REG}$: (A) RDT E (B) RDTI. ..... 53
FIGURA 35 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN}$, TENSÃO DE REFERÊNCIA DE COMPENSAÇÃO $V_{REF_COMP}$ E TENSÃO APLICADA NO TRANSFORMADOR SÉRIE $V_{ABC_TRAFO}$: (A) RDT E (B) RDTI. ..... 55

FIGURA 36 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN,}$ E TENSÃO REGULADA NA CARGA $V_{ABC_REG}$: (A) RDT E (B) RDTI. ..... 56
FIGURA 37 – TENSÕES DE LINHA NA ENTRADA E NA CARGA, ALÉM DA TENSÃO CC, SOB UM AFUNDAMENTO DE 60% NA TENSÃO DA REDE. ..... 57
FIGURA 38 – CONFIGURAÇÃO BÁSICA DO RDTSS. ..... 59
FIGURA 39 – DIAGRAMA TRIFILAR DO RDTSS. ..... 60
FIGURA 40 – DIAGRAMA VETORIAL DA OPERAÇÃO DE UM RDTSS CONTRA AFUNDAMENTOS. ..... 61
FIGURA 41 – DIAGRAMA FASORIAL DO FUNCIONAMENTO DO RDTSS: (A) UMA CARGA TEÓRICA PURAMENTE RESISTIVA E (B) UMA CARGA CAPACITIVA. ..... 62
FIGURA 42 – CONTROLE: CÁLCULO DA TENSÃO DE REFERÊNCIA A PARTIR DA SAÍDA DO PLL E DO ÂNGULO DELTA DE REGULAÇÃO CC. ..... 63
FIGURA 43 – CONTROLE: REGULAÇÃO DO CAPACITOR CC. ..... 64
FIGURA 44 – ALGORITMO DE CONTROLE DO CHAVEAMENTO DO RDTSS. ..... 65
FIGURA 45 – DIAGRAMA DO CIRCUITO IMPLEMENTADO NO PSCAD. ..... 66
FIGURA 46 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN}$, TENSÃO DE REFERÊNCIA DE COMPENSAÇÃO $V_{REF_COMP}$ E TENSÃO APLICADA NO TRANSFORMADOR SÉRIE $V_{ABC_TRAFO}$. ..... 67
FIGURA 47 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN}$ E A TENSÃO REGULADA NA CARGA $V_{ABC_REG.}$ ..... 67
FIGURA 48 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{A_IN}$, TENSÃO REGULADA NA CARGA $V_{A_REG}$, TENSÃO NO TRANSFORMADOR $V_{A_TRAFO}$ E TENSÃO DO CAPACITOR CC $V_{CC}$. ..... 68
FIGURA 49 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN}$, TENSÃO DE REFERÊNCIA DE COMPENSAÇÃO $V_{REF_COMP}$ E TENSÃO APLICADA NO TRANSFORMADOR SÉRIE $V_{ABC_TRAFO.}$ ..... 69
FIGURA 50 TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN}$ E A TENSÃO REGULADA NA CARGA $V_{ABC_REG.}$ ..... 69
FIGURA 51 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{A_IN}$, TENSÃO REGULADA NA CARGA $V_{A_REG}$, TENSÃO NO TRANSFORMADOR $V_{A_TRAFO}$ E TENSÃO DO CAPACITOR $V_{CC}$. ..... 70
FIGURA 52 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN}$, TENSÃO DE REFERÊNCIA DE COMPENSAÇÃO $V_{REF_COMP}$ E TENSÃO APLICADA NO TRANSFORMADOR SÉRIE $V_{ABC_TRAFO.}$ ..... 71
FIGURA 53 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN}$ E A TENSÃO REGULADA NA CARGA $V_{ABC_REG.}$ ..... 71
FIGURA 54 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{A_IN}$, TENSÃO REGULADA NA CARGA $V_{A_REG}$, TENSÃO NO TRANSFORMADOR $V_{A_TRAFO}$ E TENSÃO DO CAPACITOR CC $V_{CC}$. ..... 72
FIGURA 55 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN}$, TENSÃO DE REFERÊNCIA DE COMPENSAÇÃO $V_{REF_COMP}$ E TENSÃO APLICADA NO TRANSFORMADOR SÉRIE $V_{ABC_TRAFO.}$ ..... 73
FIGURA 56 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{ABC_IN,}$ E TENSÃO REGULADA NA CARGA $V_{ABC_REG.}$ ..... 74
FIGURA 57 – TENSÃO DE ENTRADA $V_{A_IN}$, TENSÃO REGULADA NA CARGA $V_{A_REG}$, TENSÃO NO TRANSFORMADOR $V_{A_TRAFO}$ E TENSÃO DO CAPACITOR CC $V_{CC}$. ..... 74
FIGURA 58 – PROTÓTIPO DE COMPENSADOR SÉRIE DE TENSÃO DESENVOLVIDO NO ELEPOT. ..... 76
FIGURA 59 – DIAGRAMA UNIFILAR DOS PROTÓTIPOS DESENVOLVIDOS NO LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA. ..... 78
FIGURA 60 – FORMAS DE ONDA NA BARRA DE ENTRADA E REGULADA APÓS A OCORRÊNCIA DE UM VTCD E A COMPENSAÇÃO DO RDT. ..... 80
FIGURA 61 – TENSÕES DE COMPENSAÇÃO APLICADAS NO TRANSFORMADOR SÉRIE DO RDT. ..... 81
FIGURA 62 – TENSÕES DE LINHA NA ENTRADA E NA BARRA REGULADA COM A COMPENSAÇÃO DO RDT EM SITUAÇÃO DE SOBRE–TENSÃO. ..... 82
FIGURA 63 – TENSÕES DE LINHA NA ENTRADA E NA BARRA REGULADA COM A COMPENSAÇÃO DO RDT EM SITUAÇÃO DE SOBRE–TENSÃO. ..... 83
FIGURA 64 – TENSÕES DE LINHA NA ENTRADA E NA CARGA, A TENSÃO DE COMPENSAÇÃO NA FASE ‘A’ E TENSÃO NO ELO CC DURANTE UM AFUNDAMENTO A 0,6 P.U.. ..... 84
FIGURA 65 – FORMAS DE ONDA NA BARRA DE ENTRADA E REGULADA APÓS A OCORRÊNCIA DE UM VTCD E A COMPENSAÇÃO DO RDTI. ..... 85
FIGURA 66 – TENSÕES DE COMPENSAÇÃO APLICADAS NO TRANSFORMADOR SÉRIE DO RDTI. ..... 86
FIGURA 67 – TENSÕES DE LINHA NA ENTRADA E NA BARRA REGULADA EM SITUAÇÃO DE DESBALANÇO. ..... 87

FIGURA 68 – TENSÕES DE LINHA NA ENTRADA E NA BARRA REGULADA COM A COMPENSAÇÃO DO RDTI EM SITUAÇÃO DE SOBRE–TENSÃO..... 88
FIGURA 69 – TENSÕES DE LINHA NA ENTRADA E NA BARRA REGULADA, TENSÃO DE COMPENSAÇÃO NA FASE ‘A’ E TENSÃO NO CAPACITOR CC EM SITUAÇÃO DE AFUNDAMENTO. ..... 89

# LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CLIENTES COM PROCESSOS SENSÍVEIS OU CRÍTICOS [2] ..... 9
TABELA 2 – SOLUÇÕES DOS PRINCIPAIS PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA. ..... 12
TABELA 3 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO ..... 42
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO: ..... 77

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A melhoria da qualidade de energia elétrica fornecida aos principais setores da economia mundial é uma das metas do setor elétrico. Neste contexto, há a necessidade de se priorizar a integração e aprimoramento das diferentes metodologias e tecnologias para aplicações industriais.

No Brasil, o atual crescimento econômico propiciou o desenvolvimento do setor industrial brasileiro, que para atender as exigências dos consumidores finais, foi obrigado a modernizar os seus processos industriais. Esta modernização contribuiu significativamente para o crescimento do uso de cargas sensíveis nas plantas industriais, que necessitam de uma energia elétrica de boa qualidade.

Com isso, os problemas relacionados à demanda energética, principalmente as variações de tensão de curta duração (VTCD's), são comuns em redes de distribuição. O fornecimento de energia de baixa qualidade pode resultar em desligamentos indesejáveis de processos industriais, no deterioramento da qualidade de produção e em alguns casos extremos até em danos aos equipamentos e onerosas perdas financeiras.

Como soluções existentes para a proteção contra afundamentos de tensão têm-se banco de capacitores, STATCOM, UPS (*Uninterruptible Power Supply*), RECET, restauradores dinâmicos, etc. Os restauradores dinâmicos de tensão – RDT são equipamentos de última geração, baseados em eletrônica de potência com chaves semicondutoras de potência como, por exemplo, o IGBT, abrangendo o conceito de *Custom Power*.

É neste cenário que se propõe o estudo de três topologias de um equipamento baseado em eletrônica de potência, que tem o papel de corrigir os distúrbios presentes na rede de distribuição. Este equipamento é denominado Restaurador Dinâmico de Tensão – RDT, com funcionalidade de regulação dinâmica da tensão, compensação de harmônicos e desbalanço de tensão, disponibilizando ao cliente uma energia de qualidade.

## 1.1 Motivação

De acordo com o cenário atual, o fator qualidade de energia elétrica vem sendo cada vez mais valorizado e priorizado. O fornecimento de energia em sistemas de distribuição tornou-se o foco de discussões e ações por parte de concessionárias, centros de pesquisa, consumidores e órgãos reguladores. É crescente o número de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANELL) que visam solucionar a geração e o impacto de distúrbios no sistema.

A evolução dos dispositivos semicondutores de potência também permitiu a ampliação do campo de estudo, viabilizando técnica e economicamente os estudos de equipamentos baseados em eletrônica de potência. Dentre as várias linhas de atuação desses equipamentos se encontra os compensadores série de tensão. Especificamente o Restaurador Dinâmico de Tensão (RDT) tem o papel básico de disponibilizar uma tensão estável e livre de perturbações.

A motivação deste trabalho é justificada pela análise operacional do funcionamento do RDT em três topologias distintas e desenvolvimento em bancada de protótipos de baixa tensão. Este estudo contribui à literatura de equipamentos modernos para a melhoria da qualidade da energia. Dessa forma, proporciona-se o desenvolvimento industrial, a estabilidade da tensão nos sistemas de distribuição e indiretamente uma economia de recursos primários.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de avaliar o desempenho operacional do RDT frente a distúrbios no sistema elétrico. Serão abordadas três topologias distintas de RDT, diferenciando-as com relação à posição da ponte a diodos com relação ao transformador série, e uma terceira, sem a fonte auxiliar de energia ativa (ponte a diodos).

Basicamente, objetiva-se avaliar o funcionamento das topologias através de simulações no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD e uma validação através de protótipos laboratoriais de baixa tensão. Os principais objetivos desta dissertação são citados abaixo:

- Avaliação dos problemas de qualidade de energia elétrica;
- Modelagem digital das três topologias no PSCAD;

- Desenvolvimento e otimização do controle;

- Analise do funcionamento individual destacando possíveis vantagens e desvantagens;

- Análise dos resultados práticos a partir de protótipos laboratoriais;

- Apresentação das conclusões obtidas;

## 1.3 Sumário

Esta dissertação é iniciada com uma breve introdução no capítulo 1 sobre o tema deste trabalho. Os conceitos básicos dos aspectos relacionados à qualidade da energia fornecida pelas concessionárias são explanados no capítulo 2. Em seguida, é apresentado o estado da arte dos compensadores de tensão no capítulo 3.

O capítulo 4 apresenta o RDT tradicional, evidenciando-se os seus componentes assim como o seu funcionamento e aplicações. Também será explorada outra topologia que se difere com relação à posição da fonte auxiliar de energia ativa para o capacitor do elo CC, denominada RDTI – Restaurador Dinâmico de Tensão Invertido.

Em seqüência o capítulo 5 apresenta a topologia de um restaurador dinâmico de tensão sem fonte auxiliar de energia ativa, apresentando-se suas características e funcionamento. Esta topologia foi denominada RDTSS – Restaurador Dinâmico de Tensão *Sag Swell*.

No capítulo 6, a partir dos protótipos de bancada do RDT e do RDTI, será realizada uma análise operacional individual, destacando-se possíveis vantagens e desvantagens. Por fim, no capítulo 7 é descrita uma conclusão contendo os aspectos mais relevantes deste estudo, assim como a continuidade dos trabalhos a serem abordados.

# CAPÍTULO 2

## PRINCÍPIOS BÁSICOS DA QUALIDADE DE ENERGIA

O termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE) é utilizado para expressar, através de indicadores qualitativos e quantitativos, os padrões de serviço e de produto oferecidos pelos diversos agentes do setor de energia elétrica aos consumidores. Basicamente, ele busca retratar a continuidade do suprimento e a conformidade das formas de onda de tensão e corrente, tomando como referência as características consideradas adequadas para o bom desempenho do sistema elétrico. A partir do QEE, o fator qualidade vem sendo cada vez mais valorizado e priorizado ao longo da última década nos principais setores da economia mundial. Como não poderia deixar de ser, o setor elétrico brasileiro vem acompanhando esta tendência.

O conceito de *Custom Power*, introduzido por Hingorani [1], é aplicado a sistemas de distribuição de energia elétrica, cujo foco é a confiabilidade e qualidade da energia elétrica entregue ao consumidor final. O termo *Custom Power* descreve o valor agregado à energia elétrica que as distribuidoras de energia e outros provedores de serviço podem oferecer aos consumidores.

A confiabilidade no fornecimento de energia elétrica deve ser avaliada sob vários aspectos, dentre os quais se destacam o número de interrupções e as variações de tensão de curta duração (VTCD). Uma energia entregue aos consumidores, de baixa qualidade, pode resultar em desligamentos indesejáveis de processos industriais, no deterioramento da qualidade de produção e em alguns casos extremos até danos em equipamentos [2][3][4]. Como uma conseqüência direta, tais problemas inevitavelmente resultam em altas perdas financeiras.

Atualmente, em várias instalações industriais, é crescente o número de equipamentos controlados a microprocessadores e cargas alimentadas por dispositivos de eletrônica de potência. O crescimento de fábricas implementando processos contínuos, tais como indústrias de semicondutores, têxteis, papel, gráficas e plásticos, tem direcionado igualmente a atenção tanto das empresas fornecedoras de energia elétrica como também das empresas consumidoras para a natureza sensível das questões relacionadas à

qualidade de energia.

Considerando um consumidor residencial, a má qualidade da energia fornecida se restringe, basicamente na falta da energia elétrica. Uma pequena interrupção no fornecimento, por exemplo, dois minutos, não acarretaria em grandes transtornos, e consequentemente em grandes perdas financeiras. Contudo, uma interrupção de algumas horas já é prejudicial ao consumidor residencial. Por outro lado, o consumidor industrial é extremante sensível a pequenas variações de tensão e não somente a interrupções. Dentre outros setores industriais críticos podem ser citados a siderurgia, a tecelagem e a camisaria, onde a ocorrência de VTCD resulta na intervenção e manutenção imediata do processo e a sua reinicialização, descartando os produtos defeituosos.

A maior parte das perturbações presentes nas redes elétricas consiste em VTCD. Estudos demonstram que estes afundamentos representam aproximadamente 90% dos distúrbios que prejudicam as cargas sensíveis. As causas mais freqüentes dos afundamentos momentâneos de tensão são os fenômenos naturais (não previsíveis), tais como descargas atmosféricas.

Portanto, é neste contexto de distribuição de energia que o presente capítulo se enquadra, englobando um resumo sobre definições, termos técnicos, normas de controle e identificação dos problemas típicos de QEE. Os itens seguintes abordarão tais aspectos.

## 2.1 Normas e Regulamentações

Até o momento, o setor elétrico brasileiro não dispõe de normas e regulamentações próprias. No âmbito da QEE isso é muito prejudicial, tanto para as concessionárias, quanto para os consumidores. Com o intuito de minimizar tal cenário, foram adotadas algumas normas internacionais. As normas IEC (1000-2-2/4) e CENELEC (EN50160) definem qualidade de energia como a característica física do suprimento elétrico provido sob condições normais de operação que não interrompa ou perturbe os processos dos clientes. São várias as normas que poderiam ser listadas aqui, como por exemplo, as normas internacionais [16]–[21]. Segue abaixo uma lista de normas e entidades que podem ser citadas como exemplo:

- EN50160: é uma nova norma que cobre *flicker*, inter-harmônicos, desvios e variações de tensão, etc;

- IEC 61000-4-15: é uma norma de medição de *flicker* que inclui especificações para medidores;

- IEC 61000-4-7: descreve uma técnica de medição padrão para harmônicas;

- IEEE 519 (1992): é uma prática recomendada pela IEEE, utilizada principalmente por concessionárias de energia nos EUA. Descreve níveis aceitáveis de harmônicas para o ponto de entrega de energia pela concessionária;

- IEEE 1159 (1995): é uma prática recomendada pela IEEE para monitoração e interpretação apropriada dos fenômenos que causam problemas de qualidade de energia;

- CBEMA: *Computer and Business Equipment Manufacturers Association*. A CBEMA virou ITI em 1994. A curva CBEMA define os níveis de suportabilidade de equipamentos, em função da magnitude da tensão e da duração do distúrbio. Distúrbios que caiam fora da curva podem causar danos aos equipamentos;

- ITIC: *Information Technology Industry Council*. Grupo que trabalha para defender os interesses da indústria de informática.

## 2.2 Principais definições e termos técnicos

Os principais distúrbios de QEE são definidos e descritos pelo IEEE *Standards Coordinating Committee* 22 on *Power Quality* e outros comitês internacionais. A Figura 1 ilustra tais termos.

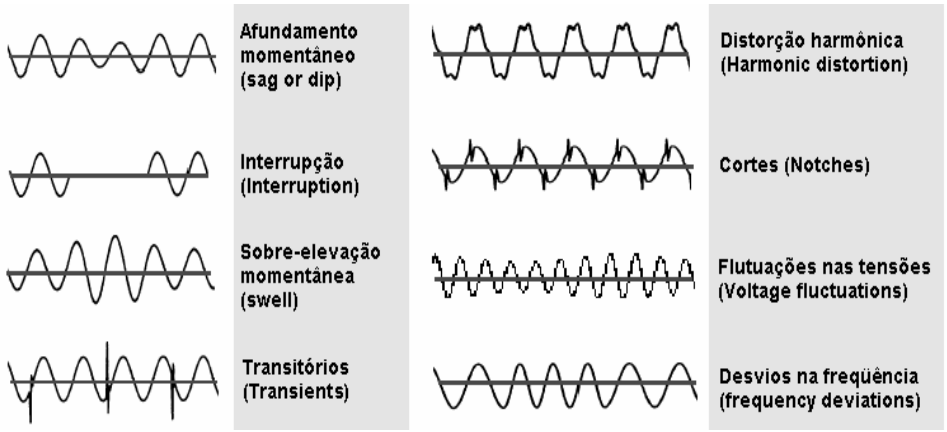



Figura 1 – Termos técnicos associadas à qualidade de energia.

Os termos técnicos e suas definições são descritas a seguir.

- Afundamento momentâneo – *Sag ou Dip*:

É definido como uma redução do valor eficaz da tensão ou da corrente na freqüência fundamental em uma ou mais fases, com duração variando de 0,5 ciclos a um minuto. Um afundamento de tensão (*voltage sag*) para 90% significa uma redução de 10% do valor nominal da tensão da linha. Os valores típicos de afundamentos variam na faixa de 0,9 a 0,1 p.u.

- Sobre-elevação momentânea – *Swell*:

É uma elevação do valor eficaz da tensão ou da corrente do sistema de potência na freqüência fundamental, com duração variando de 0,5 ciclo a um minuto. Os valores eficazes típicos estão entre 1,1 e 1,8 p.u.

- Interrupção – *Interruption*:

É a completa perda da tensão, abaixo de 0,1 p.u., em uma ou mais fases, por certo período de tempo. Interrupções momentâneas são definidas como interrupções de duração entre 0,5 ciclos e 3 segundos, interrupções temporárias duram entre 3 e 60 segundos, e interrupções sustentadas são as que apresentam uma duração maior que 60 segundos.

- Transitórios – *Transients*:

Este termo designa um fenômeno ou quantidade de variação entre dois estados permanentes durante um curto intervalo de tempo quando comparado com a escala de tempo de interesse. Um transitório pode ser um impulso unidirecional de qualquer polaridade, ou uma onda oscilatória amortecida com o primeiro pico ocorrendo em qualquer polaridade.

- Sobretensão – *Overvoltage*:

É usado para descrever um tipo de variação específico, de longa duração, no qual a tensão do sistema apresenta valor maior que o nominal por um período maior que um minuto. Valores típicos estão entre 1,1 e 1,2 p.u.

- Subtensão – *Undervoltage*:

Refere-se a uma diminuição da tensão do sistema para um valor menor que o nominal por um período maior que um minuto. Valores típicos se situam entre 0,8 e 0,9 p.u.

- Harmônicos – *Harmonics*:

São tensões ou correntes senoidais com freqüências múltiplas da freqüência fundamental do sistema. Formas de onda distorcidas podem ser decompostas de uma soma da onda de freqüência fundamental e seus harmônicos. São causados por características não lineares de equipamentos e cargas ligados ao sistema de potência.

- Inter-harmônicos – *Interharmonics*:

São tensões ou correntes senoidais com freqüências múltiplas, não inteiras, da freqüência fundamental do sistema. É causado principalmente por conversores de freqüência estáticos, ciclo conversores, motores de indução e dispositivos a arco, podendo causar o efeito *flicker* (oscilação de baixa freqüência). Sinais *de portadora* nas linhas do sistema de potência são também considerados inter-harmônicos.

- Cortes – *Notches*:

São distúrbios periódicos na tensão com duração menor que 0.5 ciclos. O *Notching* é causado principalmente por dispositivos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra, neste momento ocorre um curto-circuito de pequena duração (micro segundos), entre duas fases do circuito.

- Flutuações nas tensões – *Voltage Flutuations*:

Flutuações nas tensões são variações sistemáticas do nível de tensão, as quais normalmente estão entre 0,9 a 1,1 p.u., normalmente de baixa freqüência. Tais variações na tensão são freqüentemente referidas como flicker. O termo flicker é derivado do impacto visível (ao olho humano) das flutuações nas tensões em lâmpadas incandescentes. Entre as mais comuns causas do flicker, tanto em transmissão quanto em distribuição, estão os fornos a arco.

- Desvios na Freqüência – *Frequency deviations*:

São aumentos ou diminuições na freqüência fundamental do sistema de potência. Desvios na freqüência podem durar de alguns ciclos a algumas horas.

## 2.3 Problemas típicos de QEE

Os problemas relacionados à qualidade de energia são evidentes em muitos sistemas, tais como: comerciais, industriais e residenciais. Algumas manobras como o chaveamento de capacitores resultam em transitórios oscilatórios na rede elétrica, assim

como a partida de grandes motores que contribuem para um aumento substancial nos distúrbios da qualidade de energia. Os mais significantes e críticos problemas na qualidade de energia são os afundamentos momentâneos de tensão e a completa interrupção no fornecimento de energia.

A baixa qualidade de energia pode causar um desligamento não programado do processo industrial ou falha em equipamentos, resultando em substanciais aumentos de custos no processo. As indústrias afetadas por este fenômeno são muitas e dos mais variados ramos. Uma lista de alguns segmentos industriais, juntamente com o seu processo propenso a distúrbios, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Clientes com processos sensíveis ou críticos [2]

| **Segmento Industrial** | **Processo Industrial** |
|---|---|
| Processos contínuos | • Fabricação de papel, fibras e têxteis<br>• Extrusão de plásticos<br>• Plantas de modelagem<br>• Gráficas |
| Máquinas de precisão | • Fabricação de peças automotivas<br>• Forjamento de grandes bombas |
| Produtos e pesquisa de alta tecnologia | • Fabricação de semicondutores<br>• Grandes centros de pesquisa da física da partícula |
| Tecnologia de informação | • Centros de processamento de dados<br>• Bancos<br>• Telecomunicações<br>• Radiodifusão |
| Relacionado à segurança pessoal e patrimonial | • Processos perigosos<br>• Processamento químico<br>• Hospitais e clinicas de saúde<br>• Instalações militares<br>• Plantas auxiliares de potência<br>• Grandes subestações de transmissão |

Conforme mencionado anteriormente, estudos demonstram que VTCD's são aproximadamente 90% dos distúrbios que acometem as cargas sensíveis. Os afundamentos causados devido a curtos-circuitos são mais críticos e imprevisíveis. O afundamento de tensão existe somente enquanto estiver fluindo corrente através do curto-circuito. A tensão volta ao valor nominal tão logo a falta é extinta. Estas faltas podem ser a quilômetros de distância do consumidor, contudo podem causar grandes impactos.

Estudos apresentados em [25][26] demonstram que:

- 65% das faltas ocorridas em um sistema de distribuição aéreo são do tipo fase-terra, 10% do tipo bifásica, 20% bifásica-terra e 5% trifásica;

- 35% das faltas ocorridas em um sistema de distribuição subterrâneo são para

terra e 65% são faltas multifásicas;

- Os afundamentos momentâneos de tensão, as sobre-elevações momentâneas, as sobretensões e subtensões, apresentam valores próximos a 90% de todos os distúrbios que afetam as cargas sensíveis em um sistema de distribuição;

- A maioria dos VTCD's é menor que 40% da tensão nominal e duram menos que 10 ciclos.

Além de Variações Momentâneas de Tensão, também são inúmeros os problemas causados pela presença de harmônicos e desbalanços de tensão. As normas IEC 61000-4-7 e IEEE 519 foram adotadas para tentar minimizar a presença de tais distúrbios elétricos no sistema de distribuição.

Atualmente, com a modernização dos parques industriais, uma grande parte das cargas e seus sistemas de controle são baseados em dispositivos eletrônicos sensíveis como diodos, transistores, circuito integrado, microprocessadores, etc. Todos estes elementos vieram permitir o uso da eletricidade de uma forma mais eficiente, viabilizando um controle mais preciso sobre os processos. Entretanto, trouxeram perturbações muito significativas à qualidade da energia. Devido à sua não linearidade, os novos dispositivos são um dos principais causadores de problemas na qualidade da energia e, simultaneamente, as maiores vítimas dessa falta de qualidade, pois são altamente sensíveis às variações dos parâmetros elétricos. Perturbações mesmo muito pequenas, da ordem de alguns milisegundos, podem provocar a falha global dos sistemas onde tais dispositivos se encontrem inseridos.

A presença e proliferação deste tipo de carga vêm agravar-se continuamente, pois cada vez mais a energia é consumida por cargas não lineares. Segundo *Electric Power Research Institute* (EPRI) cerca de 60 % de toda a energia elétrica produzida é consumida por cargas não lineares. Em alguns setores, como o de serviços, este valor é muito próximo dos 100 %.

Com relação a problemas causados por desbalanços de tensão, estes são de menor intensidade. O constante desenvolvimento da economia permite a expansão dos grandes centros urbanos atendidos pelas concessionárias de distribuição de energia. Considerando que os ramais de distribuição são provenientes de projetos antigos e atualmente interligados, existem pontos fracos de tensão. Além disso, consumidores monofásicos distantes, juntamente com a má distribuição dessas cargas entre as fases, causam assim diferentes valores de tensão para cada fase disponibilizada. A presença de distúrbios monofásicos como descarga atmosférica também favorece a ocorrência de desbalanço de tensão.

## 2.4 Estado da Arte de Compensadores de Tensão

Com o progresso tecnológico, têm-se hoje chaves eletrônicas a base de semicondutores, com alta capacidade de condução de correntes e elevada tensão de bloqueio. Tal fato contribui para o desenvolvimento de compensadores mais robustos e eficientes. Há a necessidade de se dispor de dispositivos que sejam simples e funcionais, aprimorando os existentes, desenvolvendo novas tecnologias e tornando esses dispositivos financeiramente mais acessíveis. Com isso, as aplicações de eletrônica de potência já vêm há algum tempo sendo implantadas em vários segmentos do setor elétrico.

Uma das aplicações de Eletrônica de Potência visa garantir a qualidade e confiabilidade da energia entregue ao consumidor, que é o foco do conceito de *Custom Power*. Existem alguns projetos pilotos de DVR's (*Dynamic Voltage Restorer*) instalados pelo mundo, os quais provêm uma melhor qualidade de energia aos consumidores e permitem assim a geração de produtos com maiores índices de qualidade e menores custos de produção.

As soluções clássicas para a regulação de tensão, como o emprego de bancos capacitores e compensadores estáticos de reativos (*Static Var Compensator* – SVC), controlam a tensão de uma forma indireta, com a mudança da impedância efetiva do sistema. Uma outra forma de proteger as instalações contra as perturbações da rede elétrica é a instalação de sistemas UPS (*Uninterruptible Power Supply*), de resposta rápida e grande escala de potência. Porém, a utilização de UPS não é recomendável para alguns casos, já que estes se destinam a compensar a perda total da energia elétrica.

A maioria dos problemas se deve a perturbações muito breves, de curta duração, que normalmente afetam só uma fase. Na ocorrência de faltas no sistema elétrico, a variação de tensão de curta duração (VTCD) deve ser solucionada com a injeção de tensão controlada a partir do suprimento de energia ativa. O Restaurador Dinâmico de Tensão (RDT) é um dos equipamentos que tem tal finalidade, atendendo o conceito de *Custom Power*. Ele opera dinamicamente no sistema elétrico, proporcionando assim uma proteção de quase 90% dos distúrbios presentes na rede.

Com o intuito de esclarecer a escolha do RDT como foco principal desta dissertação, é de grande valia a apresentação do estado da arte dos compensadores de tensão. No item seguinte, serão abordados alguns equipamentos que provêem soluções contra os distúrbios elétricos presente na rede de distribuição, desde soluções clássicas até o uso de tecnologias inovadoras.

Há dois enfoques gerais para a atenuação de problemas de qualidade energia, seja com relação à carga ou ao sistema elétrico. Primeiramente, denominado condicionamento

de carga, é responsável por assegurar que os equipamentos de um processo industrial sejam menos sensíveis aos distúrbios elétricos. O outro é o condicionamento de linha que visa à instalação de equipamentos que suprimam ou neutralizem as perturbações presentes no sistema de distribuição.

Algumas soluções inovadoras empregando eletrônica de potência são freqüentemente aplicadas quando uma resposta rápida é essencial para suprimir ou neutralizar as perturbações. Em contrapartida, os dispositivos convencionais, como os capacitores para correção de fator de potência, são bem aplicados para regulações de tensão em regime permanente.

Quando se trata de cargas simples, a escolha correta do dispositivo de atenuação é bastante fácil. Contudo, para sistemas com cargas diversas, devem ser analisados cuidadosamente todos os aspectos do sistema de potência, como o tempo de resposta, a perda de energia do equipamento, os níveis suportáveis, entre outros. A Tabela 2 ilustra as possíveis soluções para os principais problemas de qualidade de energia [5].

Tabela 2 – Soluções dos principais problemas de qualidade de energia.

| Distúrbio Elétrico | Causas possíveis | Solução no lado do Fornecedor | Solução do lado do Consumidor |
|---|---|---|---|
| **VTCD** | • Descargas elétricas<br>• Contato de animal ou árvore na rede<br>• Partida de grandes motores<br>• Energização de transformadores | • RDT<br>• Condicionador Estático | • Condicionador de linha<br>• UPS<br>• RDT |
| **Sobretensão** | • Falta em outra fase<br>• Rejeição de Carga | • RDT<br>•Limitador de corrente de falta<br>•Pára-raios | • Condicionador de linha<br>• RDT<br>• UPS |
| **Interrupção** | • Abertura de fusível<br>• Operação de Disjuntor | • Disjuntor de estado solido (SSB) | • UPS<br>• Grupo motor-gerador |
| **Transitório** | • Descargas elétricas<br>• Chaveamento de capacitores | • Pára-raios | • Condicionador de linha<br>• Supressor de surto |
| **Distorção Harmônica** | • Cargas não lineares<br>• Ferro-ressonância | • Filtro Passivo<br>• STATCOM<br>• RDT | • Condicionador de linha<br>• Filtro<br>• RDT |
| **Ruído** | • Instalação imprópria do cliente ou do aterramento | – | • Filtro<br>• Aterramento<br>• Blindagem |

Conforme apresentado, existem diversas soluções para proteger tanto a carga quanto o sistema elétrico contra diferentes grupos de distúrbios de tensão. Em especial, percebe-se que o RDT atua contra VTCD's, harmônicos e desbalanços de tensão, como solução no lado do consumidor e do fornecedor. Os itens seguintes irão abordar as individualidades destes equipamentos.

## 2.5 Exemplos de Topologias de Compensadores de Tensão

Existem na literatura diversos reguladores de tensão, com topologias distintas. As compensações podem ser em série ou paralelo com o sistema, de forma passiva ou controlada dinamicamente. Alguns exemplos destes reguladores como Comutadores mecânicos e eletrônicos de *taps*, Banco de capacitores, UPS, Compensadores série com fonte alternativa de energia, STATCOM e o RDT, estão ilustrados na Figura 2.

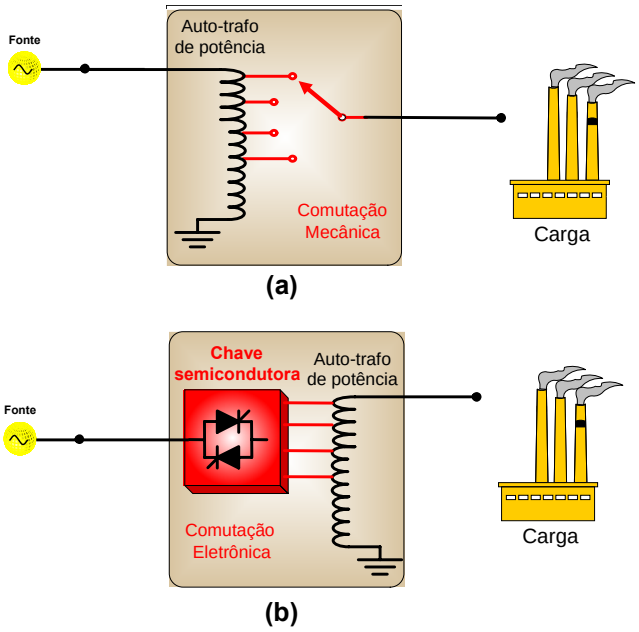



Figura 2 – Reguladores de Tensão: (a) com comutadores mecânicos de taps e (b) com comutadores eletrônicos de Taps a tiristor.

O Regulador de tensão com comutador de taps pode ser mecânico ou eletrônico, como exemplificados em [6][7]. Seu princípio de funcionamento é baseado em um autotransformador com diversos *taps*, disponibilizando vários níveis de tensão para a compensação. Geralmente são equipamentos monofásicos.

O modelo ilustrado na Figura 2 (a) varia a tensão na saída através da comutação

mecânica de *taps*, realizada por um motor acoplado que altera os contatos. Estes apresentam uma resposta lenta oriunda da atuação de um motor que controla a mudança dos *taps*. Já com os comutadores eletrônicos através de chaves estáticas Figura 2 (b), como tiristores, a comutação é dada pelo chaveamento dos tiristores usualmente na ordem de milisegundos. A soma ou subtração da tensão oriunda da comutação dos *taps* com a tensão de entrada, mantém a tensão regulada na barra.

Entretanto, os reguladores de tensão através de bancos de capacitores são largamente utilizados, inseridos em paralelo com o sistema elétrico nas três fases. O circuito de controle calcula a compensação necessária e através de chaves comutadoras é realizada uma combinação de capacitores em série e paralelo para atingir a capacitância necessária de compensação. Através do fluxo de reativos o banco regula a tensão na barra de interesse, como mostrado em [8][9]. A Figura 3 ilustra um banco de capacitores.

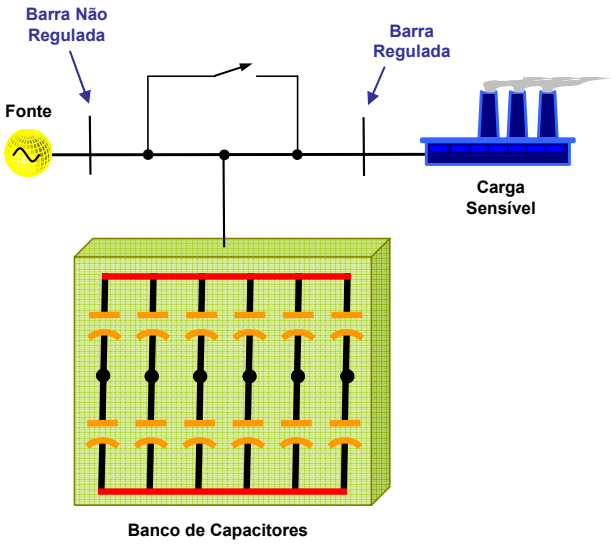



Figura 3 – Regulação de tensão através de bancos de capacitores

Com relação ao regulador de tensão UPS, este é um equipamento indicado para operar em casos de interrupção do fornecimento de energia. Normalmente sua topologia é trifásica, devido ao seu uso ser aplicado nas áreas comerciais e industriais. Seu funcionamento é baseado na retificação da tensão da rede, carregando um banco de baterias. Com a queda da tensão, o banco de baterias é conectado a um inversor que converte tensão CC em AC, mantendo a carga regulada na presença de afundamentos na entrada. Maiores aprofundamentos teóricos sobre UPS podem ser obtidos em [11][12]. Na Figura 4 é mostrado o diagrama de um UPS.

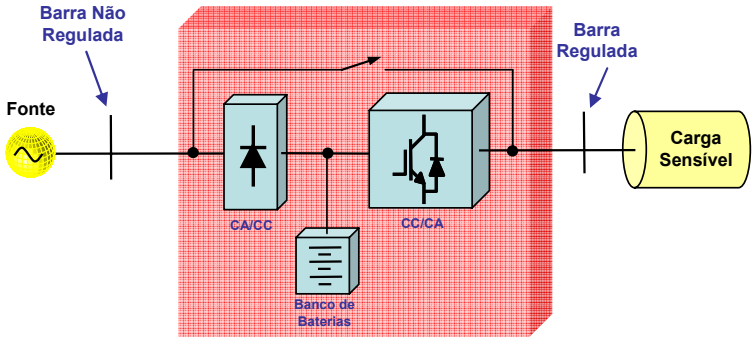



Figura 4 – Topologia de um UPS (*Uninterruptible Power Supply)*.

O STATCOM é um regulador dinâmico de tensão conectado em paralelo com a barra de distribuição. Ele controla a tensão na barra através da injeção de potência reativa no sistema. A partir da energia armazenada no capacitor CC, o conversor sintetiza uma tensão alternada, que na presença de impedâncias impõe a injeção de correntes no sistema, ora capacitiva ora indutiva, com o objetivo de aumentar e diminuir a tensão da rede, respectivamente. Maiores detalhamentos do STATCOM pode ser analisado em [13][14]. A ilustração da topologia de um STATCOM é mostrada na Figura 5.

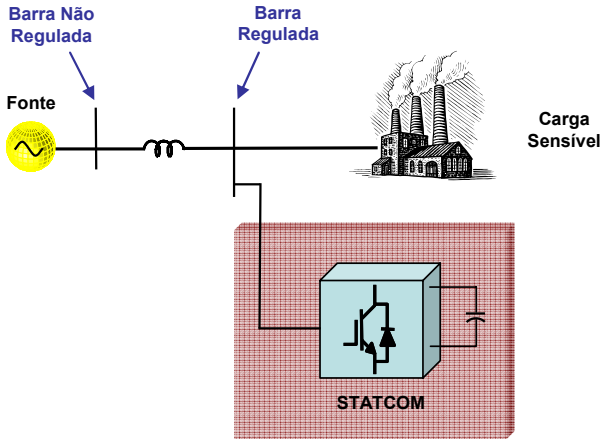



Figura 5 – Topologia do STATCOM (*Static Synchronous Compensator*).

O uso de fontes alternativas de energia vem cada vez mais ganhando importância no cenário energético. Desta forma, existem reguladores série de tensão que utilizam fontes alternativas como energia solar, eólica, célula combustível, entre outras, para captar energia do meio e armazená-la em elementos como *flywheel*, supercapacitor, banco de baterias,

capacitores, etc. A partir da energia CC armazenada realiza-se uma primeira conversão CC/CC para manter o capacitor do elo com uma tensão regulada. A tensão do elo CC é convertida em tensão alternada AC através dos conversores eletrônicos trifásicos, injetando tensões dinamicamente controladas na rede, regulando assim a tensão na carga. A sua conexão ao sistema pode ser realizado por transformadores monofásicos ou mesmo trifásico, em série com a rede. Como exemplo, a topologia deste conversor é mostrada na Figura 6.

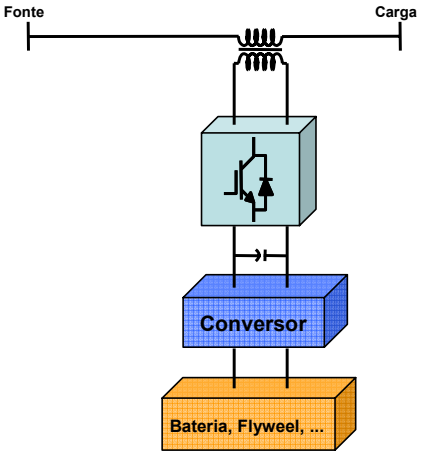



Figura 6 – Compensador série RDT associado a uma fonte alternativa de energia.

O RDT (Restaurador Dinâmico de Tensão) é um equipamento conectado em série na rede de distribuição através de transformadores monofásicos, funcionando como um regulador de tensão. Este é composto por um conversor trifásico, filtros passa-baixas, capacitor no elo CC e uma fonte de energia ativa – o retificador, conforme ilustrado na figura acima. Seu princípio de funcionamento é baseado na injeção controlada de tensão na rede de distribuição, com o objetivo de minimizar os distúrbios elétricos presentes no sistema. Tais distúrbios podem ser harmônicos de tensão, desbalanços de tensão, variações de tensão de curta duração, sobretensões, entre outros. Na Figura 7 é ilustrado o RDT.

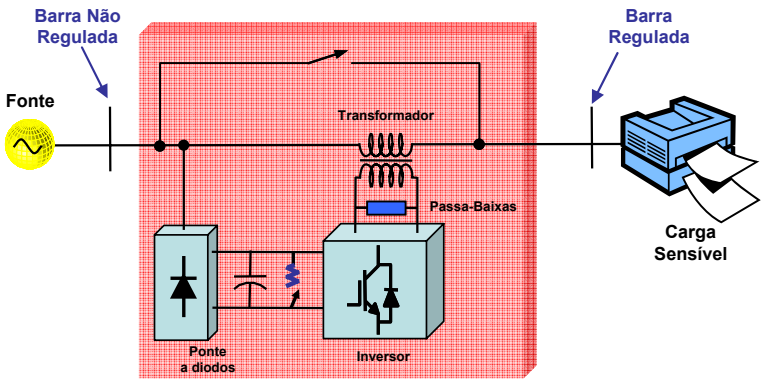



Figura 7 – Regulador série de tensão: Topologia de um RDT.

Contudo, cabe salientar que estas funcionalidades para correções dos distúrbios citados são específicas do RDT e da topologia da Figura 6 com fontes alternativas, não sendo possível com a utilização de outras soluções clássicas citadas anteriormente. Detalhes mais aprofundados sobre o RDT serão abordados no capítulo 4 e no capítulo 6.

## 2.6 Conclusões Parciais

Este capítulo apresentou os problemas relacionados à qualidade de energia, as normas e regulamentações vigentes e possíveis soluções. Como inicialmente exposto, percebeu-se o impacto da falta de uma regulamentação própria do sistema elétrico brasileiro na qualidade de energia elétrica fornecida. Ambos os lados, seja a concessionária ou o consumidor, são prejudicados com este cenário sem normas apropriadas para a nossa realidade, havendo a necessidade de uma cooperação mútua, particularizando-a caso a caso.

Também foram apresentados alguns compensadores de tensão comumente utilizados. Considerando que os distúrbios elétricos ocorrem repentinamente e de forma aleatória, pode ser verificada a ineficácia de alguns compensadores citados. Foi mostrado também que em 90% das perturbações do sistema são oriundos de VTCD.

Desta forma, um estudo sobre Restauradores Dinâmicos de Tensão tem sua justificativa para melhorar a qualidade de energia elétrica. Com isso, o RDT foi adotado como tema central desta dissertação. Os capítulos seguintes têm a finalidade de elucidar o funcionamento do RDT, o controle proposto, os resultados alcançados e as diferentes topologias escolhidas para análise.

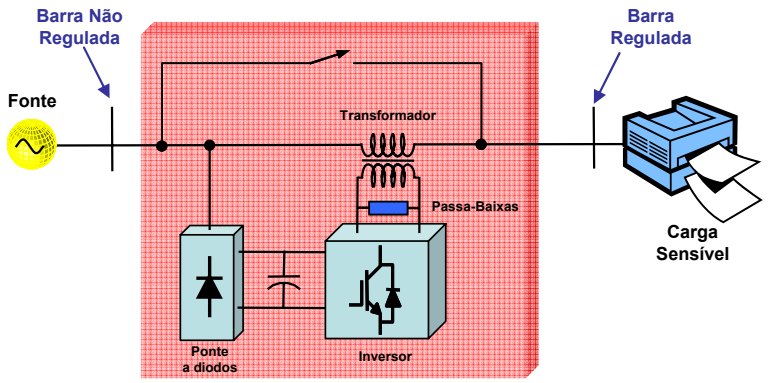
# CAPÍTULO 3

## TOPOLOGIAS COM FONTE AUXILIAR DE ENERGIA ATIVA

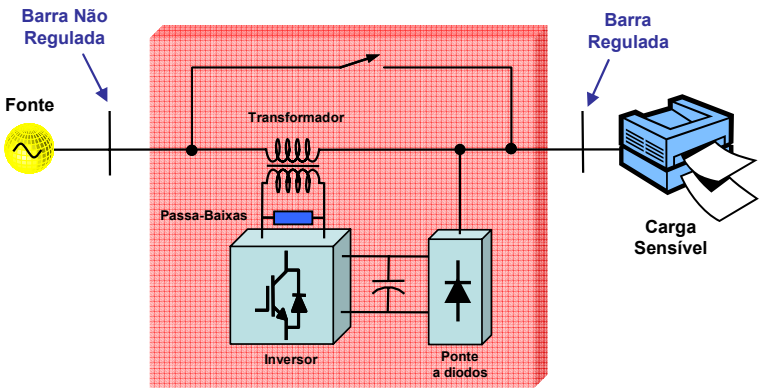
Os Compensadores Série funcionam como uma fonte de tensão controlada inserida em série com o sistema elétrico. O uso de conversores baseados em chaves semicondutoras e elementos armazenadores de energia, há de se dispor de uma fonte de energia ativa que irá suprir a injeção de tensão e as perdas do equipamento.

As topologias em estudo neste capítulo utilizam uma fonte auxiliar de energia ativa proveniente de uma ponte completa a diodos. Esta é uma solução tradicional, largamente utilizada na literatura como em [30]. Utilizando a ponte completa podem ser modeladas duas topologias distintas. A Figura 8 ilustra ambas as topologias.

Tradicionalmente, os compensadores série foram alvo de grandes números de pesquisas e desenvolvimentos, como por exemplo, o DVR (*Dynamic Voltage Restorer*). O DVR será denominado nesta dissertação como RDT (Restaurador Dinâmico de Tensão). Este equipamento possui a topologia abordada na Figura 8 (a). Contudo existem outras linhas de estudos que pesquisam a configuração com a ponte a diodo inserida entre o transformador e a carga, ou seja, na barra regulada. Esta segunda topologia é aqui denominada RDTI (Restaurador Dinâmico de Tensão Invertido), conforme ilustrado na Figura 8 (b).




(a)




(b)

Figura 8 – Topologias de compensadores série utilizando ponte completa a diodos como fonte de suprimento de energia ativa: (a) RDT e (b) RDTI.

Percebe-se nas ilustrações acima que as topologias se diferem quanto à localização do suprimento de energia ativa com relação ao transformador série. Apesar das topologias apresentarem os mesmos elementos que compõem o circuito de potência, há singularidades operacionais que destacam algumas características importantes.

Nas sessões a seguir, serão explorados os blocos do circuito de potência das topologias explanadas nas figuras anteriores, descrevendo-os com mais detalhe, exaltando suas utilidades e funcionalidades.

## 3.1 Circuito de Potência

Conforme ilustrado anteriormente, o circuito de potência do RDT e do RDTI é composto por quatro grandes partes. O retificador a diodo que tem a finalidade de fornecer energia ativa ao capacitor, funcionando este como fonte de tensão para o inversor. O inversor é utilizado para sintetizar a tensão de compensação a partir da energia armazenada no elo CC. O filtro passa – baixas é necessário devido ao chaveamento dos semicondutores do inversor em altas freqüências. Por último, os transformadores monofásicos têm a finalidade de refletir a tensão de compensação sintetizada pelo inversor no sistema, somando-a a tensão da rede.

- **O Retificador a diodo**

O compensador série em questão necessita de uma fonte de energia ativa para compensar os afundamentos de tensão do sistema que ele protege. Esta fonte de energia

pode ser um SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*), um banco de baterias, o próprio sistema através de um retificador, entre outros. Optou-se neste caso pela retirada de energia do sistema através de um retificador trifásico em ponte não controlada. Esta escolha foi feita devido ao baixo custo e alta confiabilidade do retificador a diodos em questão.

Trata-se de um retificador trifásico não controlado, composto por seis diodos, dois por fase, conforme ilustrado na Figura 9. O valor médio da tensão retificada $V_d$ pode ser obtido através da equação (1), onde $V_{LL}$ é o valor eficaz (RMS) da tensão de linha do sistema [36].

$$V_d = 1,35 \times V_{LL} \quad (1)$$

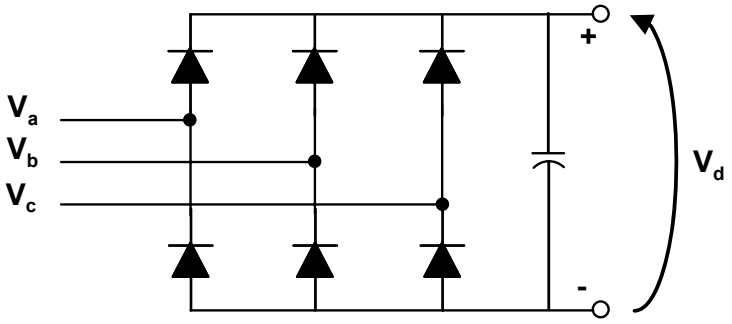



Figura 9 – Retificador trifásico em ponte não controlado.

A tensão $V_d$ é armazenada no capacitor servindo como uma fonte de tensão ao inversor. Como a máxima tensão $V_d$ retificada acompanha a magnitude da tensão de entrada, a operabilidade do equipamento fica limitada ao nível de afundamento, pois é necessária uma tensão mínima de controlabilidade para o conversor. Assim, o retificador fornece a energia ativa que será utilizada para regular a tensão de uma carga sensível frente a qualquer distúrbio elétrico no sistema, desde que sejam eles afundamentos, desbalanços e harmônicos de tensão.

- **O Inversor**

Um conversor é composto por um conjunto de componentes, na qual se destacam basicamente as chaves semicondutoras com capacidade de corte e condução, os *drivers* de disparo das chaves e o capacitor. Quando a função do conversor é gerar uma tensão alternada a partir de uma tensão contínua armazenada no capacitor, este é denominado conversor CC/AC ou inversor. Logo, o inversor tem a finalidade de sintetizar uma tensão de referência calculada pelo controle, a partir da energia armazenada no capacitor CC.

As principais chaves semicondutoras utilizadas na implementação de inversores são, atualmente, os GTO's (*Gate Turn Off Thyristors*), IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) e IGCT's (*Integrated Gate Commuttated Thyristors*). Os GTO's são chaves de alta potência, mas sua utilização é limitada às baixas freqüências, normalmente próximas à freqüência da rede. Os IGBT's são chaves que podem operar em maiores freqüências, na ordem de alguns kHz, porém em menores potências, quando comparados com os GTO's. Os IGCT's são chaves mais modernas e mais caras que os GTO's e IGBT's. Elas possuem uma capacidade de potência próxima à dos GTO's e podem operar em freqüências próximas às dos IGBT's. Neste trabalho, foi utilizado o IGBT, pois os mesmos apresentam a melhor relação custo/beneficio para o caso em questão.

Existem várias topologias de inversores trifásicos a três fios. As mais comuns são: inversor trifásico em ponte; arranjo de inversores monofásicos compondo uma estrutura trifásica e o inversor trifásico de três níveis tipo NPC (*Neutral Point Clamped*). O inversor trifásico em ponte, mostrado na Figura 10, tem a vantagem de utilizar um número menor de chaves que as outras topologias citadas, além de ser um equipamento de amplo uso. Idealmente são utilizadas duas chaves para cada fase, totalizado 6 chaves. Assim, esta topologia foi escolhida devido ao seu menor custo, simplicidade e eficiência.

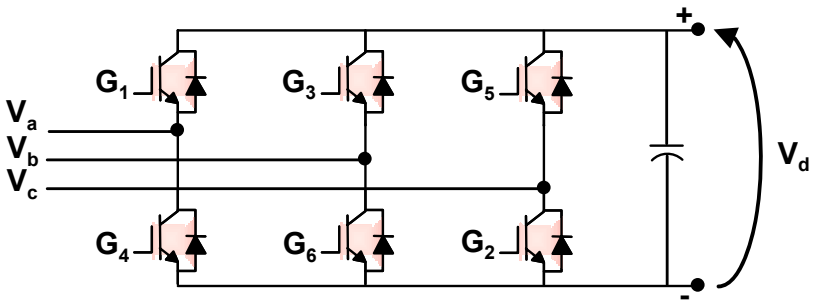



Figura 10 – Inversor trifásico em ponte.

Outro elemento importante do inversor é o capacitor do elo CC. Este deve ser calculado para poder suprir a energia suficiente para a total compensação para o qual foi projetado o equipamento, além de suprir as perdas internas. A Equação (2) é referente ao cálculo do capacitor a partir da potência do RDT instalado, tempo de atuação do capacitor e a tensão mínima no elo CC.

$$C = \frac{2 \times P \times t}{(V_d)^2} \qquad (2)$$

O funcionamento do inversor é baseado na comutação das chaves semicondutoras exemplificadas na figura anterior como $G_1$ a $G_6$. Outros parâmetros fundamentais para o correto chaveamento são as tensões de entrada, $V_a$ $V_b$ $V_c$, e a tensão do capacitor, $V_d$. Para tanto, existem na literatura diversas técnicas de chaveamento [37], cada uma com as suas vantagens e desvantagens.

Os chaveamentos ditos em baixa freqüência são aqueles que utilizam freqüências próximas à freqüência da rede, como por exemplo, a técnica de PAM (*Pulse Amplitude Modulation*). A vantagem desta técnica deve-se a menores perdas de energia nos chaveamentos, o que permite o seu uso em altas potências, algumas dezenas de megawatts. Contudo, quando se utiliza um número baixo de pulsos no chaveamento o conteúdo de harmônicos em ordens baixas pode ser alto, dificultando a sua filtragem.

As técnicas PWM (*Pulse Width Modulation*), banda de histerese, entre outras, utilizam freqüências maiores que a freqüência da rede, podendo chegar até a ordem de alguns kHz. Os harmônicos produzidos por estas técnicas estão em ordens mais altas e podem ser facilmente filtrados por pequenos elementos passivos. Também é verificado que estas técnicas permitem respostas dinâmicas mais rápidas. Contudo, devido a altas perdas de energia no chaveamento o seu uso é mais limitado com relação à potência de operação.

Existem varias técnicas de modulações do tipo PWM [31][32] tais como: a PWM senoidal; a PWM com eliminação de harmônicos; a PWM com controle adaptativo de corrente, SVPWM (*Space Vector PWM*), entre outras. As técnicas do tipo PWM permitem o controle tanto da magnitude como da freqüência das tensões geradas pelos conversores.

A técnica de chaveamento que foi utilizada neste trabalho é baseada no SVPWM [33][34] Ela apresenta algumas vantagens sobre as demais supracitadas, como a diminuição das perdas de energia durante o chaveamento, um reduzido conteúdo harmônico nas tensões de saída e permite o uso mais eficiente da tensão $V_d$ do barramento CC.

- **O Filtro Passa – Baixas do Circuito de Potência**

Como objetiva-se injetar no sistema uma tensão com conteúdo harmônico específico, é necessário o uso de um filtro na saída do conversor. Para isso, o filtro RLC passa – baixas utilizado tem a finalidade de rejeitar as componentes de altas freqüências, selecionando as freqüências de interesse. Além da freqüência fundamental (60Hz), deseja-se também inserir até o 17º harmônico para compensar possíveis distúrbios na tensão de entrada. Como referência de analogia, será chamada de secundário o lado do transformador série conectado ao conversor e primário o lado da linha. A função de transferência do filtro RLC, que relaciona a tensão de saída do inversor ($U_I$) com a tensão nos terminais do primário do transformador ($U_O$) é dada pela Equação (3). A ilustração da topologia do filtro

está presente na Figura 11.

Uma questão crítica, de suma importância, é o comportamento do filtro em relação à grandeza de corrente. Devem-se escolher os parâmetros do filtro RLC de tal forma a minimizar a corrente drenada pelo ramo RC, minimizando-se as perdas produzidas pelo elemento resistivo e a queda de tensão no reator.

$$\frac{U_O(s)}{U_I(s)} = \frac{2.\zeta.w_n.s + w_n^2}{s^2 + 2.\zeta.w_n.s + w_n^2} \text{ , onde: } w_n = \sqrt{\frac{1}{L.C}} \text{ e } \zeta = \frac{R}{2}.\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (3)$$

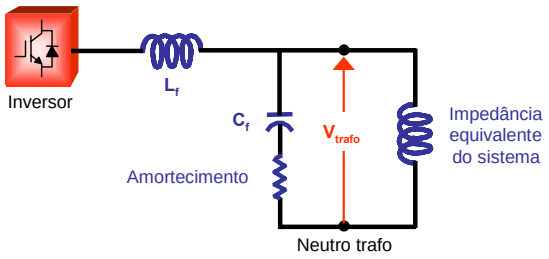



Figura 11 – Topologia do Filtro RLC passa - baixas.

Assumindo que a impedância equivalente do sistema é bem mais alta do que a impedância série RC e considerando a freqüência de corte do filtro em torno de 1kHz, pode-se assumir que esta impedância equivalente do sistema é infinita. O filtro RLC deve ser projetado para selecionar em torno do 17º harmônico (1020 kHz), para as quais se deseja realizar a compensação. Já para as freqüências próximas à freqüência de chaveamento em 7680Hz, o filtro tem a função de rejeitar todos os harmônicos não relevantes para a compensação, inclusive os harmônicos causados pelo chaveamento do conversor série a partir da técnica SVPWM.

- **O Transformador Série**

Um componente importante é o transformador série. Este deve, naturalmente, suportar a corrente nominal da carga. Contudo, a magnitude da tensão injetada por ele no sistema e, consequentemente, a sua potência é baseada no nível de compensação desejada.

Na Figura 12 observa-se a modelagem do transformador série. Nota-se que a corrente nominal da carga $I_L$ circula pelo transformador independentemente da tensão

injetada pelo conversor, determinando que o mesmo deva ter uma baixa impedância. A impedância de dispersão total é chamada de $X_t$ e a de magnetização é chamada de $X_m$. A tensão na barra de entrada, não regulada, é chamada de $V_{IN}$, a na barra regulada é $V_{REG}$, e a tensão sintetizada pelo conversor é $V_{RDT}$.

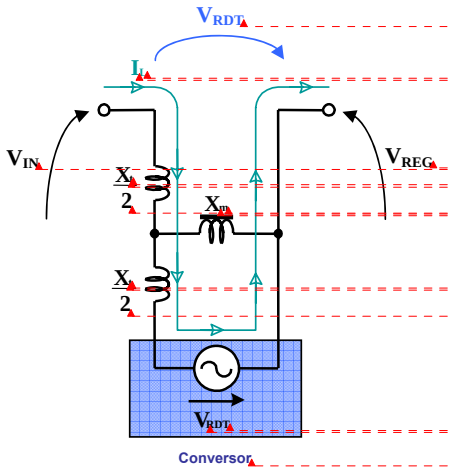



Figura 12 – Modelagem do transformador série.

No caso do RDT em questão, são utilizados três transformadores monofásicos. O primário de cada transformador é ligado em série entre o sistema e a carga. As conexões do secundário são ligadas entre as fases do conversor e os demais transformadores fechando um ponto comum (neutro).

### 3.2 Princípio de Funcionamento e Operação

Este item tem o objetivo de apresentar o princípio de operação do RDT e do RDTI. Os funcionamentos de ambas as topologias são semelhantes, diferenciando-se basicamente na posição da ponte a diodos. Por isso, será exemplificado somente o RDT, subentendendo-se o mesmo para a topologia do RDTI.

A Figura 13 ilustra um sistema básico de distribuição. Supõe-se que existam diversas cargas ao longo deste sistema, exemplificado por uma indústria na barra 1, consumidores comerciais e residenciais na barra 2 e um cliente crítico na barra ‘n’. A carga a ser protegida contra distúrbios na rede elétrica está representada por uma gráfica, no qual o RDT está inserido.



Formatado: Fonte: 10 pt
Formatado: Fonte: 15 pt
Formatado: Fonte: 15 pt
Formatado: Fonte: 10 pt
Formatado: Fonte: 10 pt
Formatado: Fonte: 15 pt
Formatado: Fonte: 15 pt
Formatado: Fonte: 15 pt
Formatado: Fonte: 15 pt
Formatado: Fonte: 15 pt
Formatado: Fonte: 15 pt
Formatado: Fonte: 15 pt
Formatado: Fonte: 15 pt
Formatado: Fonte: 15 pt
Formatado: Fonte: 15 pt
Formatado: Fonte: 6,5 pt

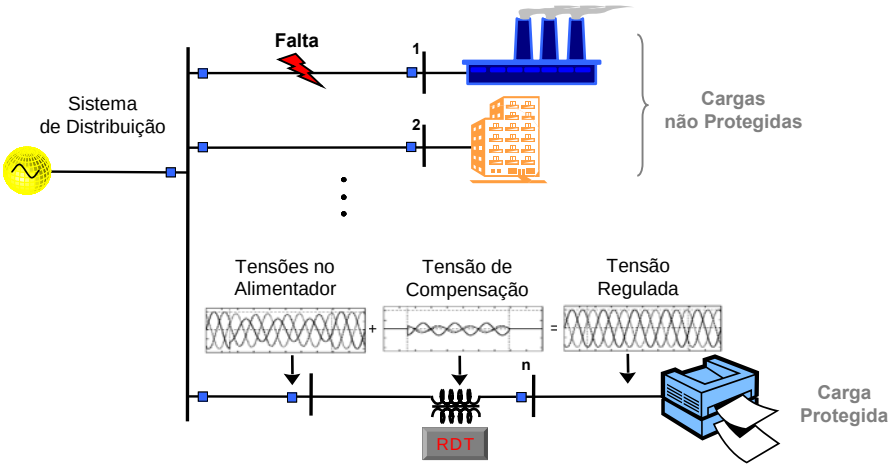



Figura 13 – Operação de um RDT em um sistema de distribuição frente a uma falta.

Para efeitos explicativos, supõe-se a ocorrência de uma falta genérica na barra 1, refletindo um afundamento momentâneo de tensão (AMT) nas demais barras. Observa-se que a tensão no alimentador apresenta desbalanço de tensão, possivelmente devido à presença de seqüência negativa. Caso não existisse um RDT protegendo a carga sensível pendurada na barra n, ela seria afetada pelo distúrbio elétrico.

Com o RDT, a presença de distúrbios momentâneos no alimentador será compensada por uma tensão equivalente injetada na rede. Este princípio funcionará independentemente do tipo de falta, com a imposição de que o sistema permaneça conectado à rede de suprimento.

A compensação é calculada a partir da tensão da barra de entrada, visando garantir uma tensão na barra regulada livre de afundamentos, desequilíbrio e harmônicos. O diagrama fasorial do funcionamento do RDT é mostrado na Figura 14.

Onde,

- $V_{abc_in}$: Tensão de fase na barra de entrada;
- $V_{abc_reg}$: Tensão de fase na carga;
- $V_{abc_RDT}$: Tensão de compensação do conversor;
- $I_{abc_in}$: Corrente de carga drenada da fonte.

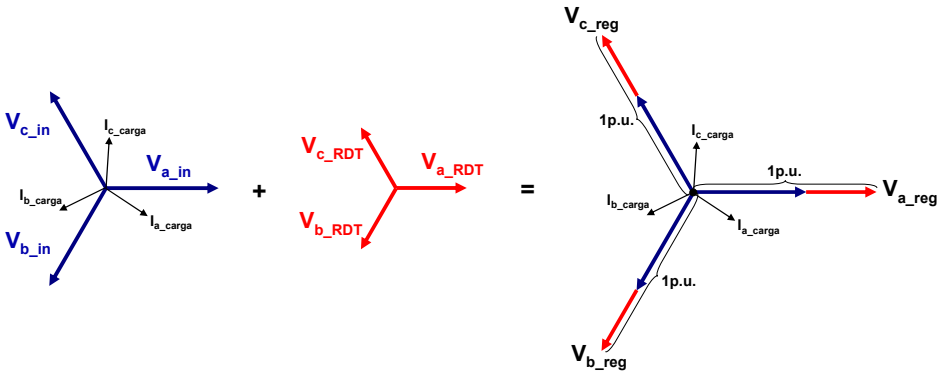



Figura 14 – Diagrama fasorial do funcionamento do RDT.

Neste exemplo foi considerada uma carga indutiva. Nota-se que a tensão compensada na barra regulada é resultante da combinação da tensão de entrada com uma tensão injetada em fase pelo equipamento. Observando também a corrente de carga, nota-se que esta está atrasada com relação à tensão de compensação, viabilizando um fluxo de potência ativa e circulação de reativos.

Como o RDT injeta ativos na rede e possui perdas internas de chaveamento é necessário suprir a energia do capacitor para mantê-lo regulado em uma tensão pré-estabelecida. A fonte auxiliar de energia ativa via ponte a diodos realiza este função. O conversor pode ser também controlado para injetar tensões de seqüência negativa ou harmônicos de tensão no sistema para melhorar a tensão de suprimento da carga.

- **Sistema de Medição, Controle e Disparo do Inversor**

Todo o funcionamento citado é resultante do comando correto de disparo das chaves do conversor. Isto é possível, pois o micro-controlador DSP calcula as tensões de referência que devem ser injetas na rede. Para tanto, o algoritmo de controle necessita de informações das grandezas elétricas do circuito de potência para efetuar o cálculo corretamente.

A Figura 15 ilustra os blocos de medição e controle do conversor, o DSP e os sinais de disparo dos *drivers*. São utilizados somente dois pontos de medição de tensão, sendo um na barra de entrada e outro na barra regulada onde a carga sensível encontra-se conectada.

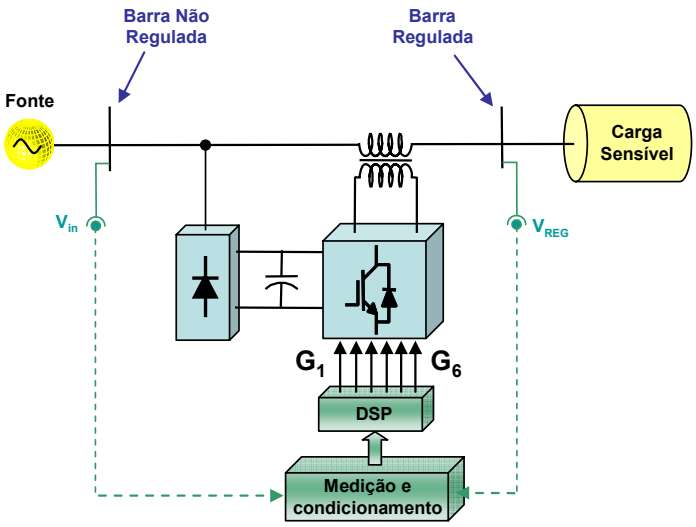



Figura 15 – Diagrama do circuito de potência com os blocos de medição e controle do RDT.

A instrumentação do equipamento é de extrema importância, pois é responsável por condicionar o sinal analógico de potência medido nas barras, para os níveis operacionais do DSP (*Digital Signal Processor*). O bloco de medição é baseado no sensoriamento das tensões por efeito *hall*. As tensões são medidas em placas de circuitos individuais, implementadas com amplificadores operacionais e filtros para eliminação de ruídos externos. Através de condutores a par trançados e blindados o sinal é enviado até a placa de condicionamento.

O bloco de condicionamento é o elo entre a medição e o processamento dos dados no DSP. Esta interface é essencial para o funcionamento do conjunto, pois os sensores disponibilizam como saída um sinal de até +/- 6 V enquanto o conversor AD (Analógico/Digital) do DSP opera entre 0 e 3 V. Com isso, tem-se um conjunto de placas de circuito impresso (PCI) para adaptar os sinais provenientes da medição, condicionando-os para a entrada do conversor AD.

O DSP envia e recebe dados externos através de portas digitais chamadas de IO (Input/Output), que também operam nas mesmas bases de tensão do AD. Como saída de dados do DSP podem ser citados os sinais de disparo dos IGBT's e os sinais de comando do circuito auxiliar. Como entrada tem-se os sinais de comando externo, os sinais de erro dos *drivers dos IGBT's* e as medições de tensão do sistema elétrico.

Outras PCI's são necessárias para receber os sinais do DSP, convertê-los em sinais óticos e envia-los através de fibra ótica até os *drivers* do conversor – bloco de disparo. O uso de fibra ótica na transmissão dos sinais de chaveamento é justificado por diversos

fatores, dentre eles, a isolação elétrica do circuito de controle com o de potência, eliminação de ruídos provenientes do chaveamento – EMI (*ElectroMagnetic Interference*), confiabilidade e durabilidade, entre outros.

O bloco de controle do RDT é o conjunto dos blocos de medição, controle, DSP e disparo. Ele tem o objetivo de controlar dinamicamente a tensão no primário do transformador série para realizar a regulação de tensão na carga crítica. Desta forma, obtendo-se os sinais medidos nas barras e comparando-as com a referência de tensão, calculam-se os sinais de compensação que servirão como base para o chaveamento SVPWM. Assim, os sinais de disparos gerados por este bloco são utilizados como entrada para o inversor, comandando as suas chaves semicondutoras.

## 3.3 Análise Preliminar das Topologias

Como explicado até o momento, o RDT drena energia ativa da rede e a injeta novamente no sistema na forma de tensão de compensação, exceto a parcela referente às perdas internas. Com relação ao RDTI, a posição da ponte a diodos viabiliza um fluxo de potência que circula internamente, pois uma parcela do suprimento de ativos da fonte auxiliar provém da rede e outra da própria injeção de tensão do RDTI. A Figura 16 ilustra esta situação.

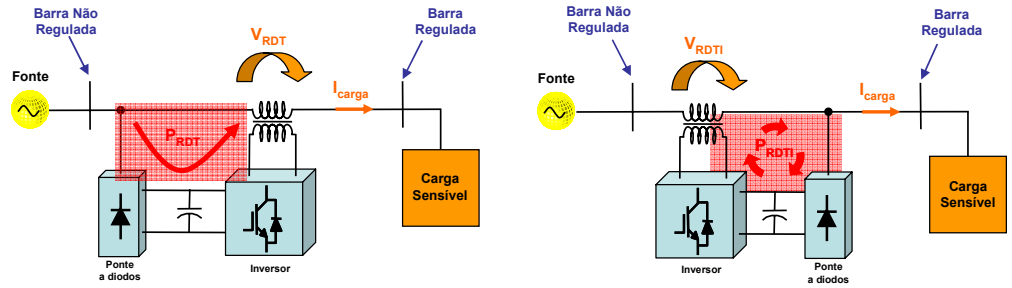



Figura 16 – Circulação de potência no RDT e no RDTI.

- **Caso base para análise do fluxo de potência**

Para exemplificar o fluxo de potência em ambas as topologias, podemos simular um caso base, exposto na Figura 17. Supõe-se uma carga de resistência constante 1p.u. e a presença de 0.8 p.u. de afundamento na tensão de entrada. A tensão de carga desejada é de 1 p.u., na qual implica também em uma corrente de carga de 1p.u, ou seja, tem-se a potência nominal na carga.

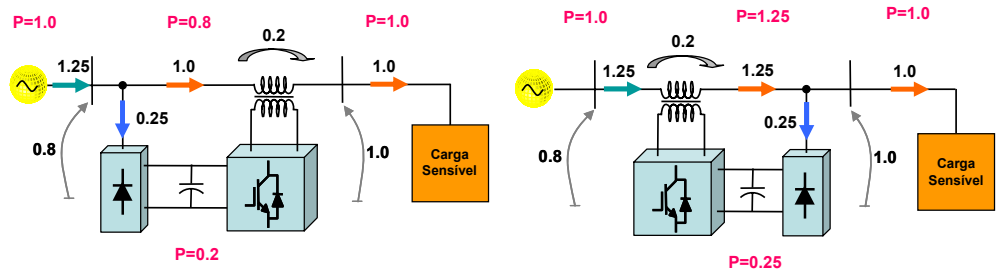



Figura 17 – Circulação interna de potência ativa e reativa no RDTI.

Considerando, no RDT, que a potência nominal entregue à carga provém da fonte de entrada que se encontra em 0.8 p.u. de tensão, logo a corrente total drenada da fonte é de 1.25 p.u.. Sabe-se que toda a corrente de carga flui através do transformador. O RDT injeta 0.2 p.u. de tensão para regular em 1.0 p.u. a tensão de carga, tendo uma corrente de carga de 1.0 p.u. passante pelo transformador. Logo, a potência injetada é de 0.2 p.u. que provém do retificador. Na presença de 0.8 p.u. de tensão na entrada e potência da ponte a diodos de 0.2 p.u., a corrente $I_D$ da ponte vale 0.25 p.u..

Já no RDTI, percebe-se que a corrente que flui através do transformador é a corrente nominal de carga somada à corrente drenada pelo retificador. Com a potência nominal vindo da fonte em 0.8 p.u. de tensão, a corrente total vale 1.25 p.u.. Como a corrente de carga é nominal, a corrente drenada na ponte é de 0.25 p.u. e a tensão da barra regulada é de 1.0 p.u., logo a potência que flui é de 0.25 p.u.. Esta potência será entregue à rede através da compensação de 0.2 p.u. de tensão e posteriormente absorvida pelo retificador, resultando em potência circulante no RDTI.

Assim, pode ser feita uma análise de potência em cada topologia em função da amplitude de afundamento. Percebe-se que toda a potência drenada pelo retificador é igual a potência de saída do conversor série, salvo as perdas de chaveamento. A potência de cada topologia é calculada em função das tensões e correntes aplicadas em cada topologia. Supondo o caso estudado anteriormente, tem-se:

$$S_{RET_RDT} = S_{INV_RDT} = V_{in} \times I_{RET} = V_{sag} \times I_{RET} \quad (4)$$

$$S_{RET_RDTI} = S_{INV_RDT} = V_{reg} \times I_{RET} = 1,0 \times I_{RET} \quad (5)$$

Dessa forma, pode ser observado que para o mesmo nível de compensação de tensão, 20%, as topologias possuem comportamentos elétricos diferentes. No exemplo acima pode ser notado que o RDTI necessita de 0.25 p.u. de potência para regular a carga, contra 0.2 p.u. do RDT.

Contudo, é de extrema importância para o controle PWM [33] uma tensão $V_{cc}$ no capacitor constante, pois a tensão injetada na rede pelo transformador é fruto do produto do índice de modulação gerado pelo controle e a metade da tensão $V_{cc}$, conforme a equação (6). Assim, verifica-se que a topologia do RDTI destaca essa vantagem, pois mantém a tensão nominal a ser retificada pela ponte, mesmo na presença de distúrbios na entrada. Dessa forma, o algoritmo de controle implementado pode ser mais robusto e eficiente.

$$V_{PWM} = m_a \times \frac{V_{cc}}{2} \tag{6}$$

Outro ponto de observação a ser analisado é com relação à energia armazenada no capacitor CC para realizar a compensação. Sabe-se que esta energia é fruto do produto da potência máxima de compensação e o tempo de atuação do capacitor CC. Considerando a potência em cada topologia descrita no caso base e o tempo de descarga do capacitor uma constante de valor um, podemos também verificar os valores de suas capacitâncias. Percebe-se que no RDTI o elemento armazenador de energia pode ser bem reduzido com relação ao RDT. Contudo, como visto anteriormente, o fluxo de corrente maior no RDTI é considerado uma desvantagem, pois aumenta a potência do transformador série. As equações abaixo ilustram o caso base exposto anteriormente.

$$C_{RDT} = \frac{2 \times E}{V_{in}{}^2} = \frac{2 \times 0,20}{(0.8)^2} = 0,625 \ \ (p.u.) \tag{7}$$

$$C_{RDTI} = \frac{2 \times E}{V_{reg}{}^2} = \frac{2 \times 0,25}{(1.0)^2} = 0,50 \ \ (p.u.) \tag{8}$$

Supondo um afundamento a 50% da tensão nominal de entrada, tem-se uma diferença considerável entre os valores das capacitâncias, como mostrado abaixo.

$$C_{RDT} = \frac{2 \times E}{V_{in}{}^2} = \frac{2 \times 0,20}{(0.5)^2} = 1,60 \ \ (p.u.) \tag{9}$$

$$C_{RDTI} = \frac{2 \times E}{V_{reg}{}^2} = \frac{2 \times 0,25}{(1.0)^2} = 0,50 \ \ (p.u.) \tag{10}$$

Assim, pode ser analisado o comportamento das topologias do RDT e do RDTI sob dois aspectos: a circulação de potência e capacitância do elo CC. Observou-se que o RDT apresentou a vantagem de realizar a compensação do sistema com uma potência inferior. Contudo, a presença da ponte a diodos no lado da carga possibilita um algoritmo de controle mais robusto e eficiente, além de um valor de capacitância menor no elo CC. Mesmo assim, ambas as topologias apresentam características semelhantes quanto ao seu funcionamento.

## 3.4 Conclusões Parciais:

Este capitulo apresentou duas topologias de RDT com fonte auxiliar de energia. O RDT conhecido na literatura internacional como DVR (*Dynamic Voltage Restorer*) e o RDTI que é uma topologia na qual a ponte a diodos se encontra conectada após o transformador série. Também foi apresentado o circuito de potência das topologias, assim como os blocos de medição, controle e disparo do conversor.

A partir de uma análise prévia foi mostrado que o RDTI necessita de uma potência superior para compensar um mesmo nível de afundamento presente na rede. Há um fluxo de energia interna no RDTI, o que pode elevar as perdas do equipamento. Contudo, para realizar a compensação de uma carga, mostrou-se que o elemento armazenador do RDT tende a ser superior ao do RDTI.

# CAPÍTULO 4

# CONTROLE DAS TOPOLOGIAS RDT E RDTI

Inicialmente, foi estudado a aplicação do controle proposto em [41] na topologia com fonte auxiliar de energia do RDTI. Este controle tem a finalidade de gerar uma tensão de compensação complementar a tensão de entrada, mantendo a carga regulada e livre da presença de distúrbios elétricos na rede. Ele é baseado no valor coletivo da tensão e no detector de seqüência positiva.

Contudo, ao longo do desenvolvimento do modelo computacional do RDT e RDTI, seguido de simulações, pode ser verificada a viabilidade de algumas simplificações. A partir de otimizações e ajustes foi implementado o controle proposto nas topologias citadas e verificados os resultados.

Dessa forma, o controle final do equipamento foi obtido através de consecutivos aprimoramentos e simplificações de um algoritmo apresentado em [38]. Obteve-se por fim um algoritmo otimizado, com respostas rápidas e robustas. Os subitens a seguir irão apresentar esta evolução para um completo entendimento do controle final proposto.

## 4.1 Controle Inicial

Inicialmente, o controle era baseado em três instâncias de controle: Controle da tensão de afundamento; Controle de harmônicos/desbalanço de tensão; e Controle de chaveamento. As entradas do controle são tensões trifásicas medidas na barra de entrada e na barra regulada, $V_{AB_in}/V_{BC_in}$ e $V_{AB_reg}/V_{BC_reg}$, respectivamente.

Os controles de afundamento e harmônico/desbalanço operam em malha aberta, somente extraindo a componente desejada da tensão de entrada. O controle de chaveamento é realizado em malha fechada, sendo necessária a realimentação da tensão de compensação aplicada no transformador. Internamente esta tensão é obtida pela diferença da tensão regulada e a de entrada.

Um resumo do diagrama de controle inicialmente utilizado é ilustrado na Figura 18.

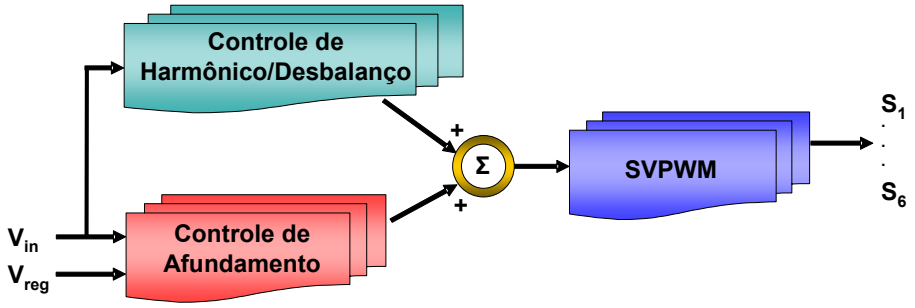



Figura 18 – Diagrama do algoritmo de controle implementado inicialmente.

O controle de afundamento é baseado no valor coletivo da tensão de entrada ($V_{col}$), conforme apresentado em seguida na Equação (11) a seguir. Contudo, estudos anteriores [41] mostraram que é necessário adicionar o cálculo do valor coletivo da tensão regulada para se obter um ajuste fino da amplitude do afundamento. O índice de afundamento é calculado a partir do valor coletivo da tensão de entrada. Assim, a tensão de compensação de afundamento $V_{abc_afund}$ é resultante do produto do índice de afundamento com uma senóide de amplitude unitária (gerador de senos), sendo esta proporcional em amplitude com a tensão de seqüência positiva da entrada.

$$V_{col} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \sqrt{(V_a)^2 + (V_b)^2 + (V_c)^2} \qquad (11)$$

O controle de harmônicos e desbalanços de tensão é baseado no detector de seqüência positiva. O PLL (*Phase Locked Loop*) é responsável pelo sincronismo, fornecendo o ângulo de fase e freqüência da tensão de entrada. Considerando que a tensão presente no sistema de distribuição apresenta distúrbios como harmônicos e/ou desbalanços, não sendo puramente senoidal, é necessário conhecer a componente fundamental de seqüência positiva da tensão de entrada. A diferença entre a tensão de seqüência positiva e a tensão de entrada resulta em uma tensão na qual estão presentes todas as componentes indesejáveis ao sistema, denominada tensão harmônica de compensação $V'_{abc_in\ harm}$.

A partir da tensão de afundamento e da tensão harmônica de compensação pode-se calcular a tensão de referência. A tensão de referência de compensação $V_{abc_ref}$ desejada é calculada na Equação (12)

$$V_{abc_ref} = V_{abc_afund} + V_{abc_harm} \qquad (12)$$

O chaveamento é um bloco de controle em malha fechada, ou seja, a tensão de referência é comparada com a tensão efetivamente aplicada no transformador $V_{abc_trafo}$. O erro passa por um controlador, que age no sentido de anular o erro em regime.

Por fim, tem-se a tensão de referência para o chaveamento $V_{abc_PWM}$. Este sinal será comparado com uma portadora triangular através da técnica de chaveamento SVPWM. Os pulsos gerados irão comandar a abertura ou fechamento dos seis IGBT's, sintetizando assim a tensão que será injetada no sistema através dos transformadores monofásicos. A Figura 19 ilustra detalhadamente o algoritmo utilizado.

Onde,

- $V_{abc_in}$: Tensão de entrada (barra não regulada);
- $V_{abc_reg}$: Tensão de saída (barra regulada);
- $V_{abc}$: Senóide amplitude unitária – sen ($\omega$t);
- $V_{abc_in}$: Tensão de seqüência positiva ($V^{+1}$);
- $V'_{abc_in\ harm}$: Tensão de compensação de harmônico/desbalanço;
- $V_{abc_afund}$: Tensão de compensação de afundamento;
- $V_{abc_comp_ref}$: Tensão de referência de compensação;
- $V_{abc_trafo}$: Tensão injetada no transformador ($V_{abc_reg} – V_{abc_in}$);
- $V_{abc_PWM}$: Tensão de referência para o chaveamento SVPWM;
- G1 a G6: Sinais de disparo dos IGBT's.

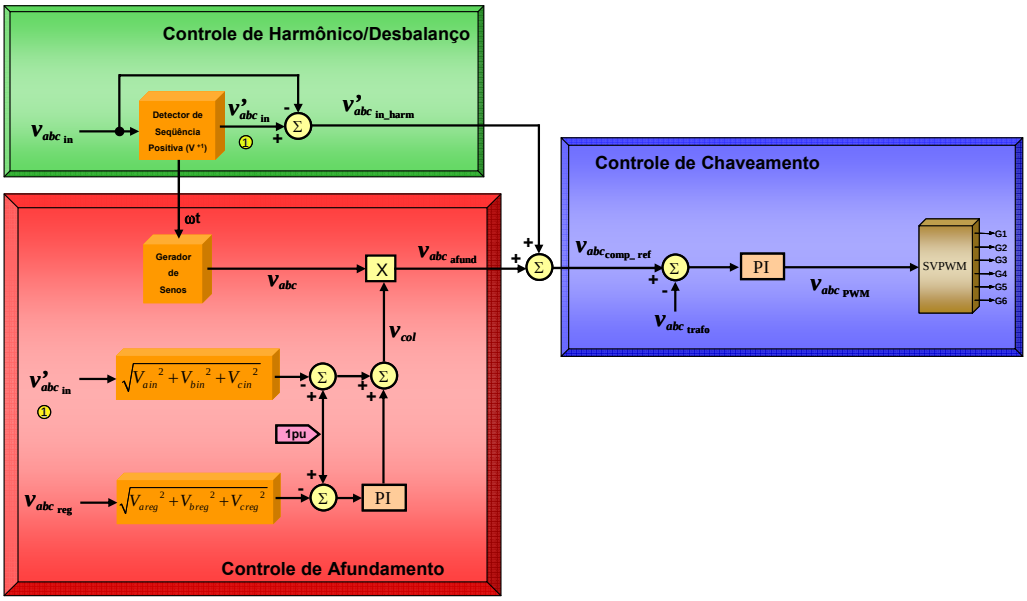



Figura 19 – Diagrama detalhado dos blocos do algoritmo inicial de Controle.

- **O PLL (*Phase Locked Loop*)**

Este é um dispositivo muito usado em áreas como telecomunicação, automação e outros campos como controle de equipamentos condicionadores de energia elétrica baseados em Eletrônica de Potência. Ele é aplicado há vários anos e considerado um algoritmo robusto e eficiente. Com as mais diversas finalidades, atua como sintetizador de freqüência para geração de portadoras e sinais de sincronismo. Basicamente, ele é composto por um detector de fase, por um filtro passa–baixas e um oscilador controlado por tensão (VCO – *Voltage Controlled Oscilator*) em malha fechada. Sua finalidade é gerar uma senóide em fase com a entrada, visando o sincronismo do sistema. O diagrama de blocos do PLL está ilustrado na Figura 20.

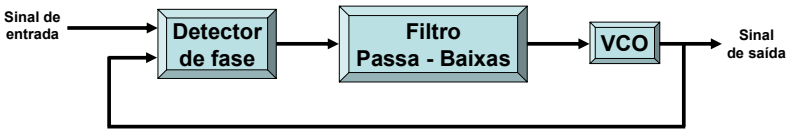



Figura 20 – Diagrama básico do PLL.

O detector de fase tem seu funcionamento dado pela comparação de fase entre o sinal de entrada e o realimentado. As possíveis oscilações de alta freqüência presentes na saída do detector são filtradas pelo filtro passa–baixas, fornecendo a parcela contínua como

referência para o VCO. O oscilador gera um sinal cuja freqüência de saída é proporcional à sua entrada, realimentando o sistema. Em regime, a saída do VCO tende a uma senóide com a mesma freqüência do sinal de entrada.

Existem vários estudos do emprego do PLL em sistemas trifásicos [28][29]. Sua principal funcionalidade nesta área é sincronizar os sinais de controle com a tensão ou corrente da rede. Este PLL baseado na teoria PQ, como ilustrado em [30][39], produz um sinal em quadratura com a componente fundamental de seqüência positiva do sinal de entrada, mesmo na presença de distúrbios elétricos como harmônicos e desbalanços. O algoritmo detalhado do PLL é ilustrado na Figura 21.

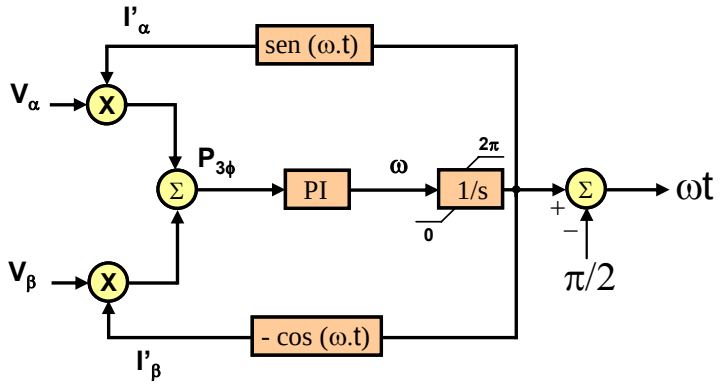



Figura 21 – Algoritmo do PLL baseado na teoria PQ.

As variáveis de entrada do PLL estão num referencial alfa/beta estático. As realimentações $I'_{\alpha}$ e $I'_{\beta}$ são chamadas de correntes fictícias. O cálculo da transformação para componente alfa-beta está ilustrado na equação abaixo.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

Assim, o produto entre as tensões de entrada e as correntes fictícias tem como resultado potências também chamada de fictícias. Segundo a teoria PQ, a soma dessas potências calculadas resulta em uma potência instantânea trifásica.

$$p_3' = V_\alpha \times I'_\alpha + V_\beta \times I'_\beta \quad (14)$$

O controlador PI utilizado tem a finalidade de anular o erro de entrada em regime. Quando isto ocorrer o PLL estará estabilizado, capturando a freqüência e fase da tensão de entrada. Contudo, a partir da equação da potência apresentada e do algoritmo do PLL

observa-se que existem dois pontos de operação em que a potência é nula. Quando as correntes fictícias de realimentação estiverem adiantadas ou atrasadas de 90º com relação a componente fundamental de seqüência positiva da tensão de entrada, a potência será nula e o algoritmo estabilizará. Porém, quando a corrente estiver atrasada de 90º com o sinal de entrada, é um ponto instável de operação, na qual qualquer distúrbio do sistema o PLL sai de sincronismo.

Desta forma, a saída do PLL dada pela variável $\omega t$ está adiantada de 90º com relação a componente de seqüência positiva do sinal de entrada. Para isso, subtrai-se este ângulo para que a mesma esteja em fase com a entrada. A Figura 22 abaixo ilustra a forma de onda obtida com o PLL em questão, mesmo na presença de distúrbios elétricos.

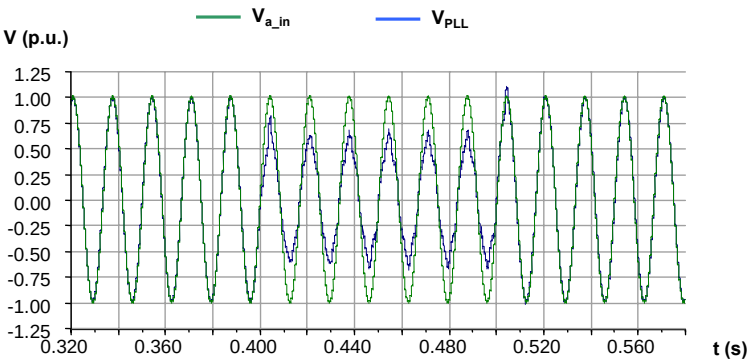



Figura 22 – Formas de onda da tensão de entrada e a referência de saída do PLL.

Pode-se notar, que mesmo na presença de afundamentos e harmônicos na tensão de entrada, o PLL mantém a saída sincronizada com a componente fundamental de seqüência positiva da entrada. Porém, a amplitude de saída deste tipo de PLL é sempre unitária.

- **O Detector de Seqüência Positiva**

O detector de seqüência positiva também é baseado na Teoria de Potências Instantâneas – PQ [30][39]. Este bloco tem a finalidade de obter a componente fundamental de seqüência positiva de um sinal, ou seja, preservando a amplitude. Como visto no PLL, este é capaz de separar a seqüência positiva, porém a amplitude de saída é sempre unitária.

As correntes fictícias $I'_{\alpha}$ e $I'_{\beta}$ são de seqüência positiva e puramente senoidais, oriundas do gerador de senos e cossenos. O produto dessas correntes com as tensões $V_{\alpha}$ e $V_{\beta}$ resulta n as potências fictícias ativas e reativas. Tal resultado apresenta uma parcela

constante e outra parcela oscilante proveniente das possíveis distorções presentes na entrada. Assim, utiliza-se um filtro passa–baixas para separar esta parcela constante que representa a componente fundamental. O diagrama de blocos dos cálculos é apresentado na Figura 23.

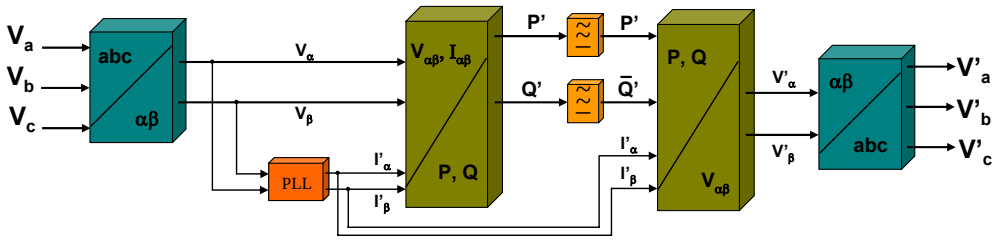



Figura 23 – Algoritmo do Detector de Seqüência Positiva.

A partir das potências fictícias podem ser obtidas as tensões de fase de seqüência positiva. É através de uma transforma inversa de *Clarke* que se obtêm o valor da componente fundamental de seqüência positiva da tensão de entrada. As potências ativas e reativas, e a transformada inversa de Clarke, baseada na teoria PQ, utilizadas nos blocos da figura acima estão descritas nas equações abaixo, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} = . \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{I'^{\,2}_\alpha + I'^{\,2}_\beta} \times \begin{bmatrix} I'_\alpha & -I'_\beta \\ I'_\beta & I'_\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \tag{17}$$

A partir de estudos entre diversos algoritmos de controle vislumbrou-se um aprimoramento deste algoritmo apresentado. Com o intuito de minimizar os cálculos e diminuir o esforço computacional, foi proposto um novo controle para ambas as topologias, apresentando significativas simplificações. Estes dados serão tratados no próximo item.

## 4.2 Controle Otimizado

Baseado no algoritmo apresentado, buscou-se esforços com o objetivo de aprimorar o controle utilizado inicialmente. Conforme ilustrado na Figura 23 e nas equações 15 a 17 observa-se que o detector de seqüência positiva exige um grande esforço computacional.

Outro ponto observado é o cálculo do valor coletivo da tensão. Ele é baseado nos valores RMS das tensões conforme a Equação (11). Considerando tensões balanceadas e amplitude nominal, tem-se 1 p.u. de valor coletivo. Contudo, um sistema desbalanceado pode apresentar valores de tensões que aplicados na equação resulte em um valor coletivo unitário. Com isso, o algoritmo de cálculo do valor coletivo utilizado no controle inicial pode não detectar um possível afundamento de tensão. Como exemplo, tem-se um caso que as tensões de linha ($V_{ab}$, $V_{bc}$ e $V_{ca}$) medidas em RMS valem: 200V, 220V e 240V, respectivamente. Dessa forma, como resultado da equação obtém-se também 220V (1p.u.), porém apresentam desbalanços de tensão na ordem de 10% nas fases ‘a’ e ‘c’.

Alem disso, utilizando-se o valor coletivo no controle não é possível corrigir, imediatamente, somente a fase problemática. O controle tentaria injetar tensões iguais de compensação nas três fases até estabilizar o sistema. No exemplo exposto anteriormente, utilizando um controle independente por fases, seria identificado que na fase ‘b’ a tensão de compensação seria zero. Porém, nas outras fases afetadas haveria referências de compensação proporcionais ao distúrbio ocorrido, otimizando a resposta do equipamento.

Com isso, foi proposto inicialmente um controle independente por fase em [40]. O cálculo das tensões de compensação é realizado separadamente, vislumbrando um melhor aproveitamento do inversor, robustez e rapidez na resposta.

O objetivo do equipamento é manter uma tensão regulada na carga, somente com a componente fundamental de seqüência positiva, livre de distúrbios e de amplitude unitária. Dessa forma, observando-se o PLL foi constatado que este fornece uma tensão de amplitude unitária, em fase e freqüência com a tensão de entrada, ou seja, a referência desejada de tensão na carga.

Logo, não é mais necessário saber a componente de seqüência positiva da entrada. Comparando a tensão de referência do PLL com a tensão medida na entrada, obtêm-se exatamente todas as componentes indesejáveis ao sistema. Basta então sintetizar esta tensão de compensação e injetá-la através do transformador. Com isso, elimina-se o detector de seqüência positiva e o cálculo do valor coletivo.

Salienta-se que o PLL aqui utilizado é baseado nas tensões trifásicas ‘abc’ e não

mais na componente alfa-beta da transformada de *Clarke.* O seu princípio de funcionamento é mesmo citado no item anterior, na qual o algoritmo estabiliza a sua saída quando os produtos das realimentações com a entrada são nulos. A Figura 24 ilustra o algoritmo do PLL trifásico utilizado.

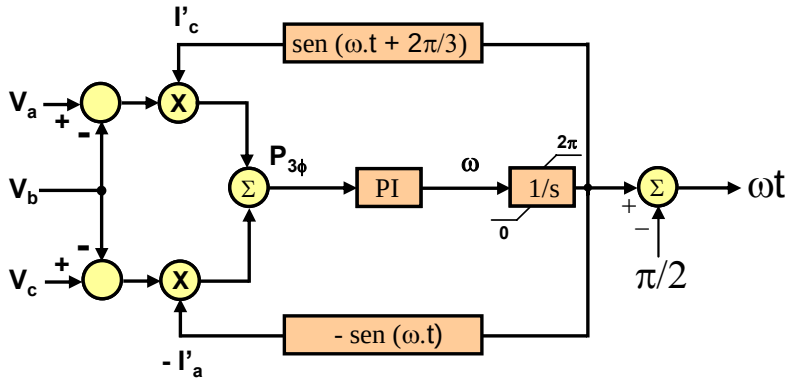



Figura 24 – Algoritmo do PLL trifásico.

Quando a realimentação ($I'_c$) estiver em quadratura com a tensão $V_{ab}$ a potência fictícia é nula. Da mesma forma, tem-se nula a potência nula quando $V_{cb}$ estiver em quadratura com ($– I'_a$). Desta forma a potência trifásica fictícia é nula e o algoritmo entra em regime disponibilizando uma saída 'ωt' adiantada de 90º com a fase 'a' da rede.

Assim, após a apresentação do funcionamento do algoritmo de controle otimizado, ilustra-se na Figura 25 o diagrama de blocos desenvolvido.

Onde,

- $V_{abc_in}$: Tensão de entrada (barra não regulada);
- $V_{abc_ref}$: Tensão de referência do PLL;
- $V_{abc_comp_ref}$: Tensão de referência de compensação do PLL;
- $V_{abc_trafo}$: Tensão injetada no transformador ($V_{abc_reg} – V_{abc_in}$);
- $V_{abc_PWM}$: Tensão de referência para o chaveamento SVPWM
- G1 a G6: Sinais de disparo dos IGBT's.

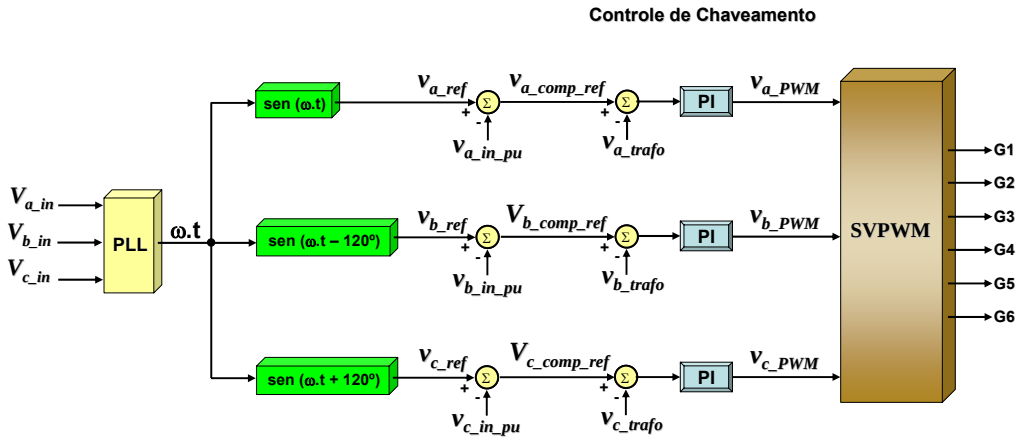



Figura 25 – Algoritmo de controle simplificado proposto.

A tensão de referência de compensação $V_{abc_comp_ref}$ é resultante da comparação de senóides igualmente espaçadas de 120º com as tensões presentes na entrada. Percebe-se que a $V_{abc_comp_ref}$ é constituída por componentes indesejáveis ao sistema. Com isso, bastaria sintetizar esta tensão no inversor.

Contudo, a tensão de referência de compensação $V_{abc_comp_ref}$ calculada pelo controle é ideal. Não inclui uma parcela de perdas, possíveis atenuações e defasagens que possa ocorrer até que seja efetivamente injetada pelo transformador. O controlador PI tem a finalidade de anular o erro em regime entre a $V_{abc_comp_ref}$ e a tensão real injetada pelo transformador.

Em especial, destaca-se então a simplicidade do algoritmo proposto, como uma das contribuições desta dissertação. Comparando o algoritmo proposto na Figura 25 com o controle inicial da Figura 19 percebe-se as diversas simplificações, facilitando sua implementação em micro controlador. A seguir serão apresentadas as simulações das topologias.

## 4.3 Simulação das Topologias

Foi desenvolvido no PSCAD/EMTDC um modelo digital simulando uma rede de distribuição onde estão presentes duas cargas genéricas. Foi definida uma carga “RL” protegida pelo compensador série e uma segunda caracterizada por uma ponte completa não controlada em paralelo com uma carga resistiva. A ponte é a carga não protegida e geradora de harmônicos. Os parâmetros utilizados na simulação estão na tabela abaixo.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados na simulação

| | | |
|---|---|---|
| **PARÂMETROS DO SISTEMA ELÉTRICO** | | |
| Tensão nominal de linha | V_fonte | 220 V |
| Freqüência | f | 60 Hz |
| Indutância da linha | L_fonte | 10 mH |
| **PARÂMETROS DA CARGA SENSÍVEL** | | |
| Potência | P | 2 kW |
| Resistência | R_carga | 27 Ω |
| Indutância | L_carga | 44 mH |
| **PARÂMETROS DO RDT E RDTI** | | |
| Indutor de alisamento do retificador | L_ret | 1.5 mH |
| Capacitor do elo CC (RDT/RDTI) | C_inv_RDT | 4700 μF |
| Indutor do filtro | L_filtro | 1.5 mH |
| Capacitor do filtro | C_filtro | 20 μF |
| Resistor do filtro | R_filtro | 5 Ω |
| Freqüência de chaveamento | F_sw | 7680 Hz |
| **TRANSFORMADOR SÉRIE** | | |
| Indutância de dispersão | Ls | 2mH |
| Relação de espiras | | 1:1 |
| Potência | kW | 2.5 |
| **PARÂMETROS DA CARGA NÃO LINEAR** | | |
| Indutor de alisamento | L_harm | 1.0 mH |
| Capacitor CC | C_harm | 1000 μF |
| Resistor CC | R_harm | 50 Ω |
| **PARÂMETROS DA CARGA RESISTIVA** | | |
| Resistor | R | 15 Ω |

Inicialmente, foi adotado a tensão de 220 V trifásico em 60 Hz de freqüência da rede. Estipulou-se um valor para simular a indutância da linha de transmissão e/ou transformadores na ordem de 10 mH. Esta indutância é muito superior a de um caso padrão,

porém pode ser avaliado como pior caso, pois quanto maior esse valor maior a distorção presente na entrada do sistema. A carga crítica simulada é de 2 kW de potência, confeccionada a partir de reatores de 44 mH e lâmpadas incandescentes de 500 W / 127 V ligados em série e estrela.

O inversor utilizado na simulação contém parâmetros do utilizado na prática, fabricado pela Semikron, para obter um modelo teórico próximo ao que será implantado na prática. Os valores de capacitâncias do elo CC adotados são de 4.700 μF. Este valor foi calculado pela Semikron, supondo uma potência de 15 kVA do equipamento, tempo de descarga 16,66 milisegundos e tensão CC de 300 V. O filtro RLC considerando uma freqüência de corte em torno de 1kHz, foi calculado obtendo-se um reator de 1,5 mH, um capacitor de 20 μF e um resistor de 5 Ω.

A freqüência de chaveamento utilizada é proporcional à freqüência da rede em 7680 Hz. Com o objetivo de amenizar variações rápidas na corrente drenada pela ponte a diodos, foi utilizado um reator de 1,5 mH. O transformador série tem uma relação unitária entre o primário e secundário, operando até 127 V e potência de 2,5 kW, com uma indutância de dispersão de 2 mH e resistência interna desprezível.

Em paralelo com a carga crítica foi colocada uma carga não linear implementado com um retificador a diodos, com um reator de alisamento na entrada de 1mH e carga RC de 50 Ω e 1000 μF, respectivamente. Foi então adicionada mais uma carga ao sistema, sendo esta puramente resistiva no valor de 30 Ω, ligada em estrela.

O algoritmo proposto no controle simplificado foi implementado no simulador de transitórios eletromagnéticos EMTDC/PSCAD. Na Figura 26 abaixo é ilustrado o circuito de potência simulado.

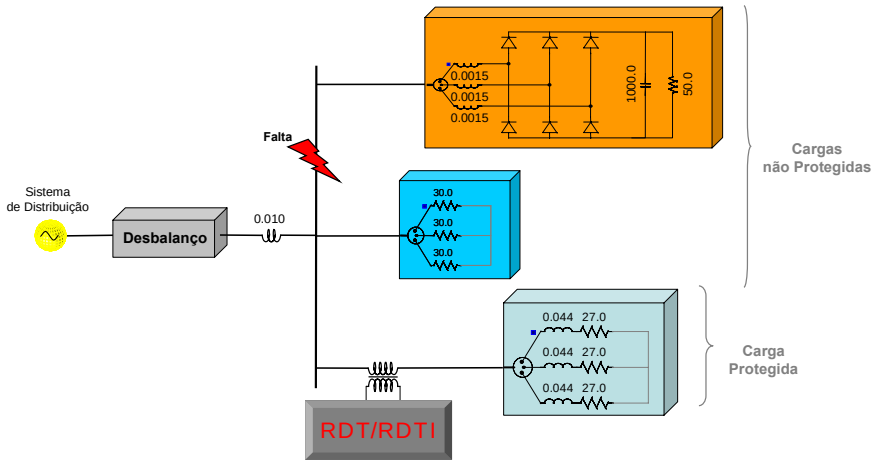


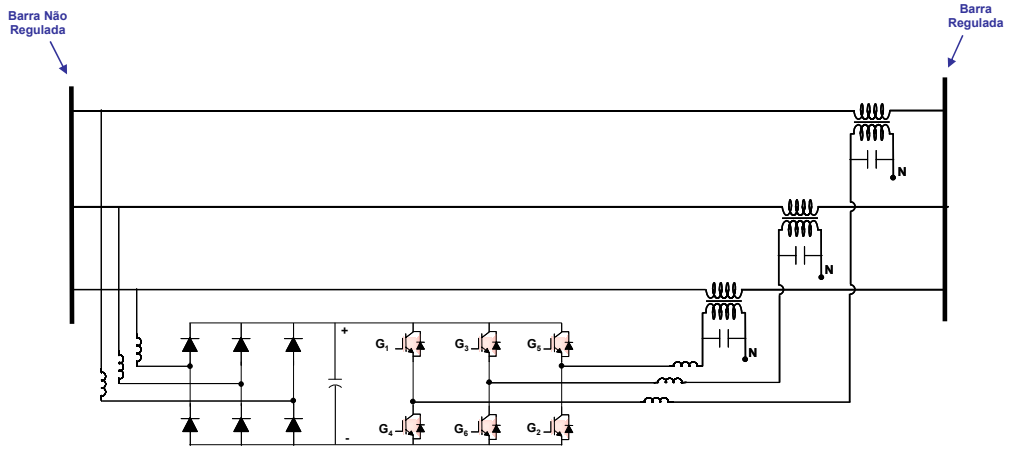

Figura 26 – Diagrama do circuito de potência simulado: RDT e RDTI.

Primeiramente, cabe destacar o circuito de desbalanço utilizado. Ele é composto por três transformadores série, com uma relação de transformação de 10:1. O desbalanço de tensão utilizado deve-se à injeção de tensões de seqüência negativa, ACB. Os três transformadores são conectados em estrela. Aplicando-se a tensão de rede no secundário, tem-se no primário uma tensão dez vezes menor que a entrada. Essas tensões são injetadas em série com a rede, porém em seqüência negativa, ou seja, soma-se 10% de $V_{a_in}$ em $V_{a_in}$, 10% de $V_{c_in}$ em $V_{b_in}$ e 10% de $V_{b_in}$ em $V_{c_in}$. Abaixo está descrito como se obtém a tensão desbalanceada.

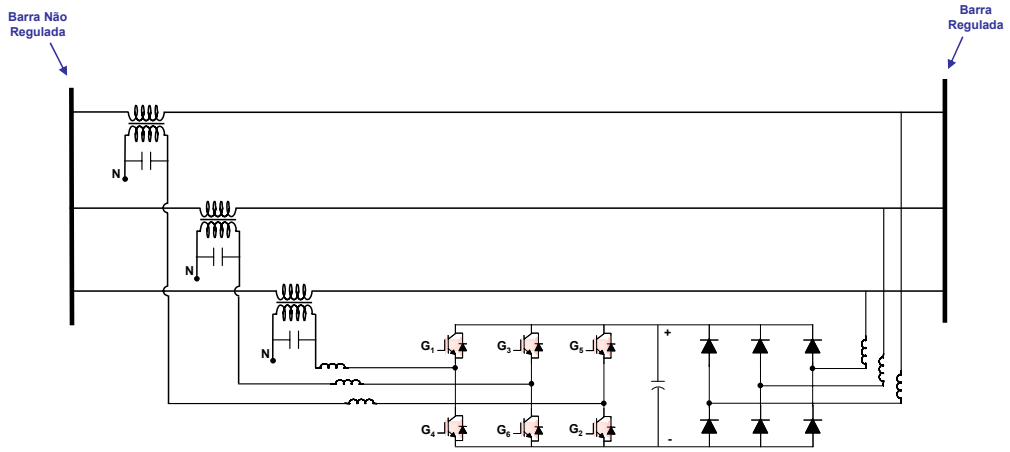
- $V_{a_desb} = V_{a_in} + (0.1 \times V_{a_in})$;
- $V_{b_desb} = V_{b_in} + (0.1 \times V_{c_in})$;
- $V_{c_desb} = V_{c_in} + (0.1 \times V_{b_in})$.

A simulação de falta no circuito pode ser feita de duas formas. Inserindo-se uma carga indutiva ligada em estrela na barra de entrada, em paralelo com as demais. Ao conectá-la ao sistema, aumenta-se a corrente drenada da fonte, que na presença da indutância da rede, gera um afundamento na tensão de entrada. Porém o modo utilizado é mais simples. Foi introduzido um variador de tensão (Variac) após a fonte de entrada, viabilizando uma simulação de afundamentos ou mesmo sobre–tensoes.

O circuito simulado apresentado na Figura 26, destacando-se o bloco que representa o RDT/RDTI. Este bloco é composto por transformadores, os filtros LC, a ponte a diodos, o inversor e o elo CC. Os circuitos de potência estão ilustrados na Figura 27.




(a)



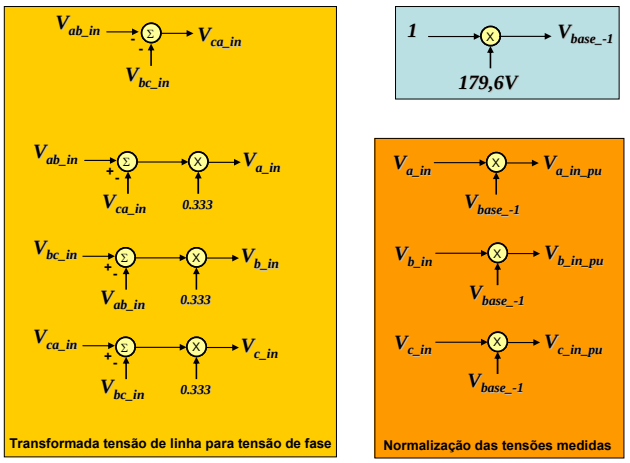

(b)

Figura 27 – Diagrama trifilar dos equipamentos: (a) RDT e (b) RDTI.

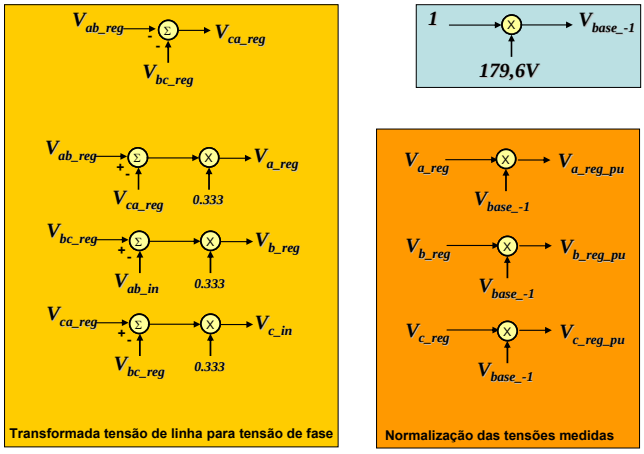
Percebe-se na figura acima a conexão da ponte a diodos no lado da carga, no caso do RDTI. Além disso, o capacitor CC é comum ao inversor e ao retificador não controlado. Pode ser notado também o filtro LC do chaveamento em alta freqüência. Os transformadores série têm um ponto comum no secundário, sendo este o “nó” chamado de neutro do transformador.

- **Controle Modelado no Simulador**

Com o circuito modelado, é então apresentado o algoritmo de controle implementado no PSCAD. O controle é dividido em três grandes partes. A primeira é constituída pelos os blocos de medição e normalização das medidas elétricas. O segundo é dado pelo sincronismo e cálculo da tensão de referência, e por último tem-se o controle de chaveamento e geração dos sinais de disparos das chaves do inversor. A Figura 28 ilustra o controle.




(a)




(b)

Figura 28 – Diagrama de medição e normalização das grandezas elétricas: (a) tensões da barra de entrada e (b) tensões da barra regulada.

Com o intuito de minimizar a quantidade de sensores de tensão, foram medidas as tensões de linha da entrada e da barra regulada nas fases $V_{ab}$ e $V_{bc}$. Contudo, o algoritmo de controle proposto é monofásico necessitando uma transformação para tensões de fase. A tensão base do sistema foi escolhida de modo que seja o “pico” de uma senóide de amplitude nominal de fase em 127 V RMS, ou seja, $V_{base}$ vale 179,6V. Dada a tensão base, podem ser obtidas as tensões medidas normalizadas em p.u.. A tensão aplicada no sistema pelo transformador série não é medida diretamente. Ela é obtida através da comparação da tensão $V_{abc_reg}$ com a tensão $V_{abc_in}$.

As tensões de referência foram obtidas a partir do circuito de sincronismo do PLL. Considerando que essas senóides são de amplitude unitária, em fase e freqüência com a tensão de fase da entrada, compara-se com as tensões medidas, obtendo-se as tensões de compensação de referência. Na Figura 29 é ilustrado o circuito de sincronismo e o cálculo da tensão de referência.

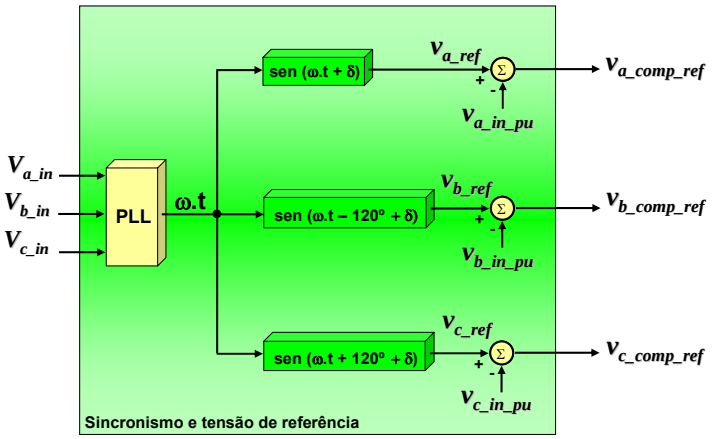



Figura 29 – Diagrama de sincronismo e cálculo da tensão de referência.

O sinal da comparação é positivo para a senóide do PLL e negativo para a tensão de entrada. Este fato é válido, pois se a tensão de entrada for menor que a tensão de referência, o controle fornece um erro positivo. Este erro tende a aumentar o sinal de referência de compensação que implicará em uma tensão maior no transformador, levando a tensão de carga à amplitude unitária, como é desejado.

A partir das tensões de referência calculadas, é utilizado o bloco de controle de chaveamento. Este bloco tem a finalidade de gerar as tensões de compensação a partir das referências fornecidas, e sintetiza-las através dos sinais de disparo das chaves do conversor. O controle de chaveamento está mostrado na Figura 30.

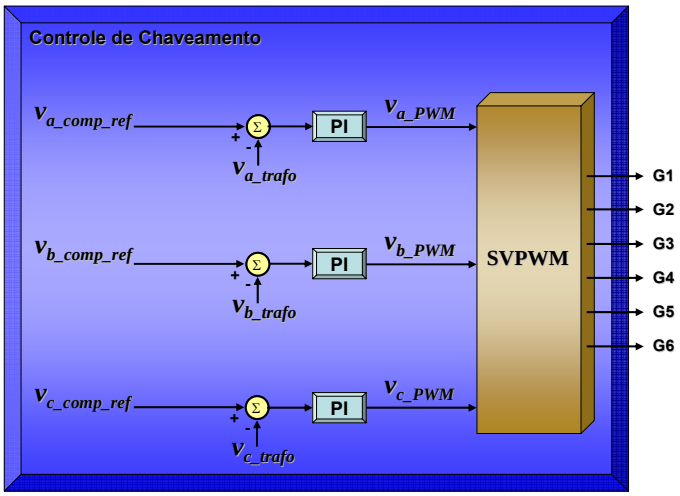



Figura 30 – Diagrama de controle: Cálculo das tensões de referência para o chaveamento.

A tensão de referência é comparada com a tensão medida no transformador, o erro passa por controlador proporcional/integral, que tende este erro a zero em regime. Percebe-se que a realimentação da tensão do transformador possui um sinal negativo. Supondo que a tensão injetada no sistema seja menor que a tensão de referência, logo o erro é positivo para aumentar a tensão de referência do PWM, aumentando a tensão injetada, levando a tensão de carga à amplitude desejada. Os ganhos utilizados no controlador PI foram: KP = 3.0 e KI = 0.001 ms. Com as tensões de referência do PWM já calculadas, falta gerar os pulsos de disparos das chaves do inversor. O cálculo dos sinais de disparo provém da técnica de chaveamento SVPWM citada no inicio deste capítulo.

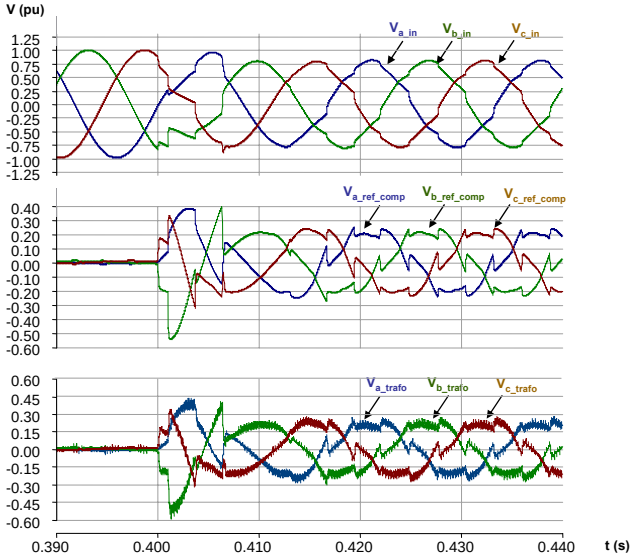
### 4.3.1 Resultados das Simulações

As figuras 31 a 37 ilustram o comportamento do algoritmo proposto em simulações no programa de transitórios eletromagnéticos EMTDC/PSCAD. São ilustradas as formas de onda que demonstram o comportamento das variáveis de controle e das respostas operacionais das topologias do RDT e do RDTI frente a diferentes distúrbios no sistema elétrico. As faltas a serem simuladas são: VTCD de 20%, desbalanço de tensão de 20% e sobre–tensão de 20% na barra de entrada. Por fim é apresentado a resposta das topologias frente a um afundamento de 60% nas tensão da rede.

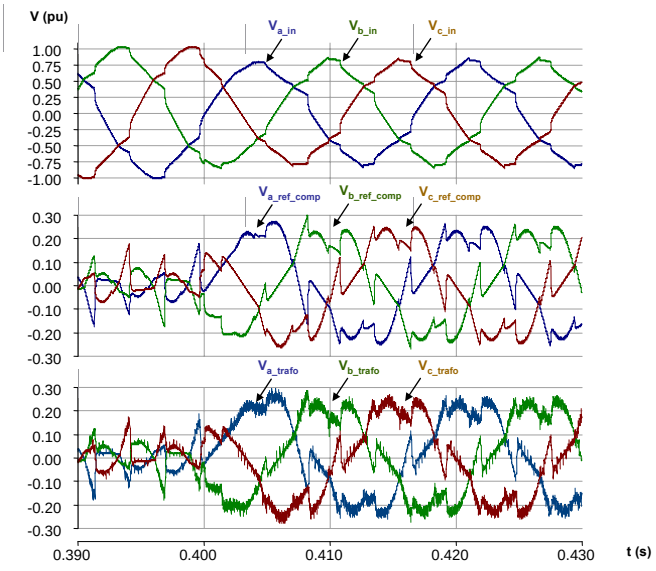
**a. VTCD de 20% na tensão nominal da barra de distribuição e presença de harmônicos (em 0,4 s);**

A ocorrência de variações de tensão de curta duração impacta o valor nominal da

tensão na barra de entrada, e consequentemente na barra regulada. Com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo digital, foi simulada uma falta com um afundamento trifásico a 0.8 p.u. durante 200ms. A presença da ponte a diodos em ambas as topologias em estudo, viabilizou também a ocorrência de harmônicos de tensão.




(a)

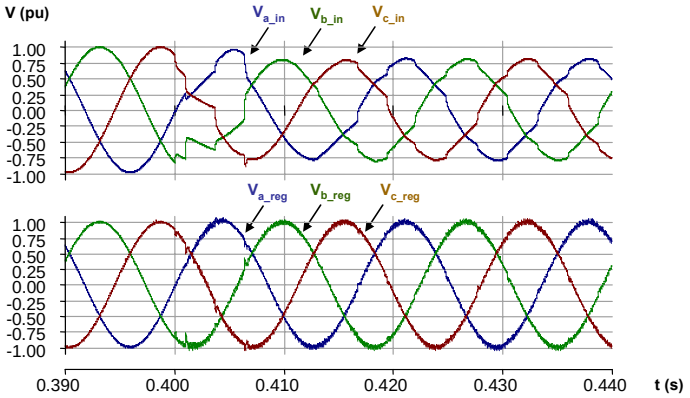



(b)

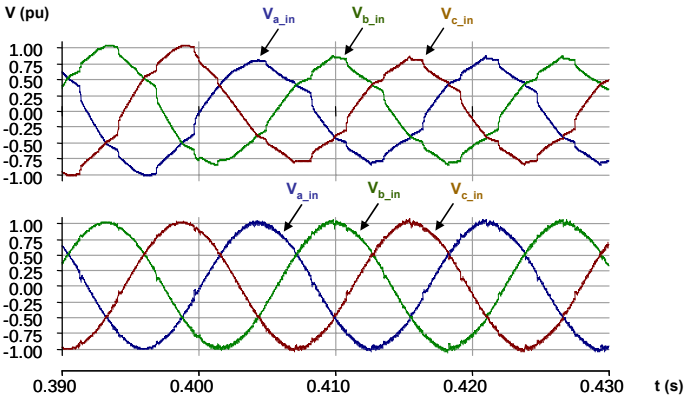
Figura 31 – Tensão de entrada $V_{abc_in}$, tensão de referência de compensação $V_{ref_comp}$ e tensão aplicada no transformador série $V_{abc_trafo}$: (a) RDT e (b) RDTI.

Os gráficos da Figura 31 mostram as tensões de entrada, as tensões de referência de compensação e a tensão real aplicada no transformador. Primeiramente, percebe-se que as tensões na entrada não têm formas senoidais e com amplitudes menores que a nominal (0.8 p.u.). A barra de entrada do RDTI apresenta maiores distorções devido a maior amplitude da corrente drenada pelo retificador.

Nota-se que ambas as tensões injetadas no sistema seguiram a referência calculada pelo controle. Contudo, devido à corrente total que flui através do transformador série ser maior e mais distorcida no RDTI, a tensão injeta por este seguiu esta tendência. A tensão de referência de compensação apresenta uma parcela em fase para a compensação da componente fundamental e outra parcela distorcida, em contra fase com a entrada, para a compensação dos distúrbios presentes na tensão. Sua amplitude é proporcional ao afundamento na entrada (0.2 p.u.).




(a)




(b)

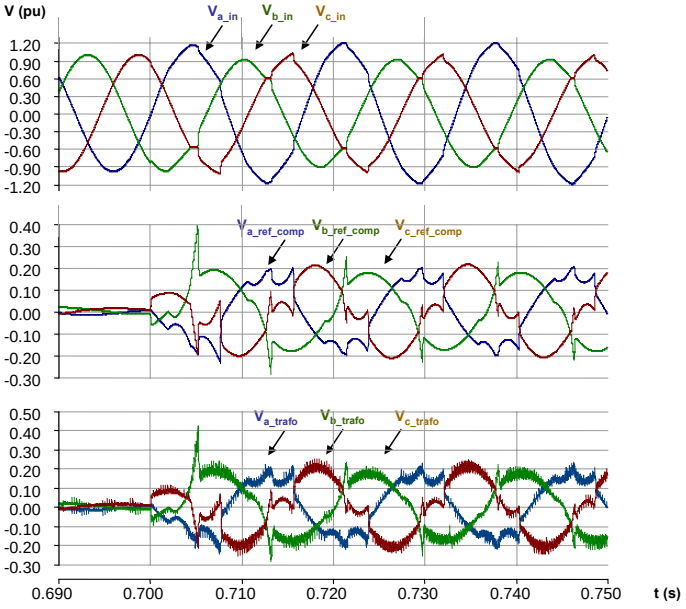
Figura 32 – Tensão de entrada $V_{abc_in}$ e a tensão regulada na carga $V_{abc_reg}$: (a) RDT e (b) RDTI.

Os gráficos da Figura 32 apresentam as tensões na entrada e na barra regulada em ambas as topologias. Observa-se que em ambos os casos, mesmo na presença de tensões distorcidas na entrada, a tensão regulada tem amplitude nominal e livre de harmônicos de baixa freqüência.

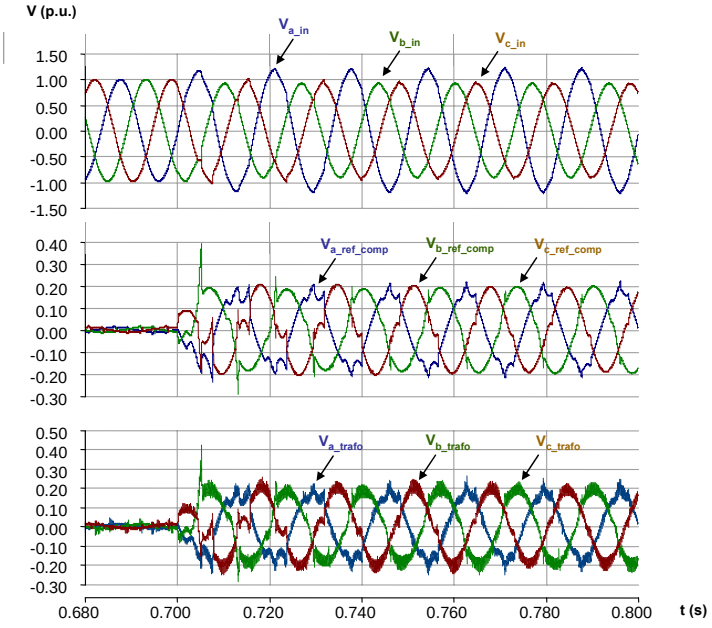
A compensação é praticamente instantânea, não se observando qualquer transitório significativo na tensão regulada. Com a presença do RDT e do RDTI observa-se que a carga fica protegida contra o VTCD e harmônicos, disponibilizando uma tensão regulada em 1.0 p.u.. As respostas transitórias de ambas as topologias foram satisfatórias, demonstrando ser robusto e rápido.

**b. Desbalanço de tensão de 20% na tensão nominal da barra de distribuição (em 0,7s);**

Este fenômeno ocorre devido à presença de cargas desbalanceadas na barra de distribuição e/ou ocorrência de curtos e descargas atmosféricas. Sua freqüência é baixa, contudo problemática para consumidores sensíveis â variações bruscas de tensão. Foi então simulada a presença de tensões de seqüência negativa de amplitude 0.2 p.u. somada à tensão nominal da rede.




(a)



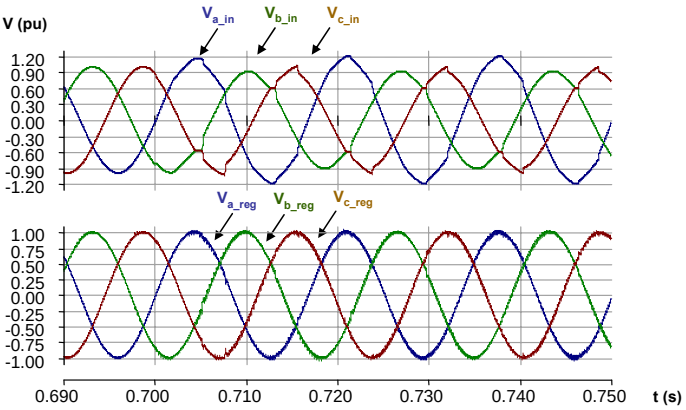

(b)

Figura 33 – Tensão de entrada $V_{abc_in}$, tensão de referência de compensação $V_{ref_comp}$ e tensão aplicada no transformador série $V_{abc_trafo}$: (a) RDT e (b) RDTI.

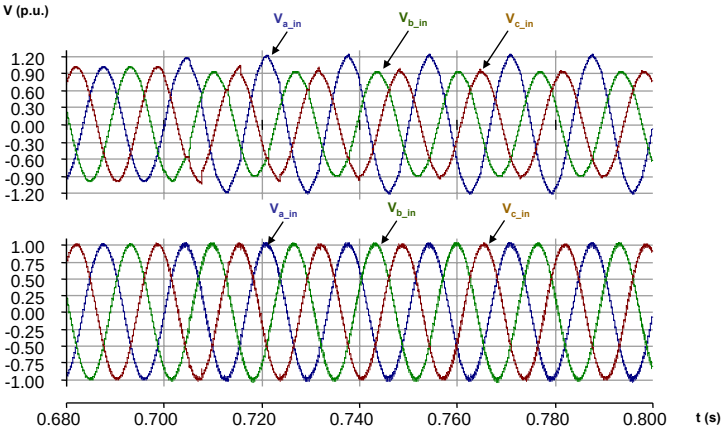
Os gráficos apresentados na Figura 33 mostram as tensões de entrada, a tensão e referência de compensação e a tensão injetada pelo transformador. Nota-se que a presença da seqüência negativa na barra de entrada elevou a amplitude da tensão na fase ‘a’ e diminui as demais fases ‘b’ e ‘c’. Com isso, o algoritmo de controle detecta e calcula as novas referências de compensação, para eliminar a presença do desbalanço na carga sensível.

Nota-se que a tensão injetada pelo transformador segue a referência calculada pelo algoritmo. Em especial, a tensão de referência na fase ’a’ está em contra fase com a entrada, diminuindo a amplitude de $V_{abc_in}$, mantendo estável a tensão de carga. As tensões aplicadas nas demais fases ‘b’ e ‘c’ estão em fase, como era esperado.

Destaca-se que a compensação da fase ‘a’, por injetar uma tensão em contra–fase, absorve energia ativa do sistema para o elo CC. Contudo, a compensação das fases ‘b’ e ‘c’ que é realizada em fase com a entrada, retira energia do elo CC para realizar a compensação.




(a)




(b)

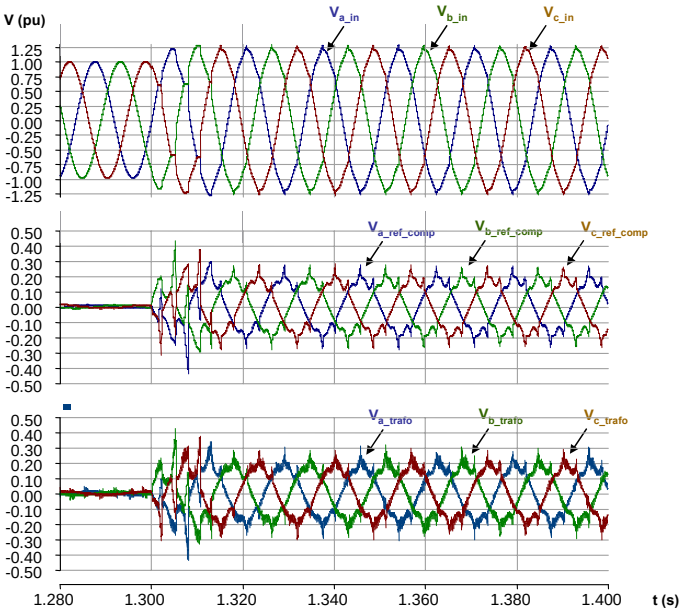
Figura 34 Tensão de entrada $V_{abc_in}$ e a tensão regulada na carga $V_{abc_reg}$: (a) RDT e (b) RDTI.

As tensões de entrada e da carga crítica estão ilustradas nos gráficos da Figura 34. A tensão na entrada está desbalanceada, apresentando sobre-tensão na fase ‘a’ e sub-tensões nas demais fases. A partir da compensação da tensão de rede, é adicionada ao desbalanço uma distorção proveniente da corrente drenada pela ponte a diodos.

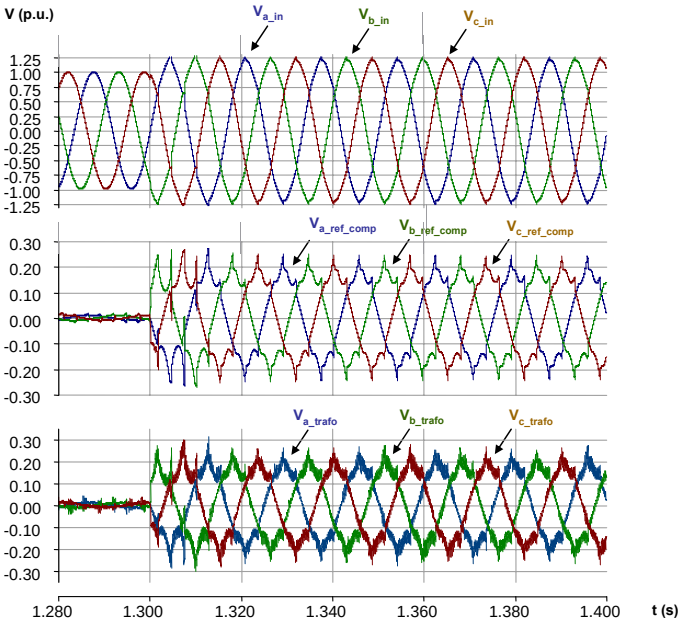
A ocorrência de uma falta devido ao desbalanço de tensão não afeta à carga crítica, que dispõe de uma tensão nominal e uma presença de harmônicos de alta freqüência. Percebe-se também que o transitório de operação do conversor não apresenta oscilações, compensando praticamente de forma instantânea a carga, com uma resposta rápida. Em ambas as topologias, houve total compensação do desbalanço presente na tensão de entrada.

**c. Sobre–tensão de 20% na tensão nominal da barra de distribuição.**

Este item visa simular a ocorrência de um aumento momentâneo da tensão nominal da rede. Este tipo de falta não é muito comum no sistema elétrico, porém os impactos resultantes de sua ocorrência são desastrosos. Com a operação de equipamentos sob condições acima da tensão nominal podem ocorrer-lhos danos irreversíveis ao funcionamento, como a queima de elementos internos, por exemplo.




(a)




(b)

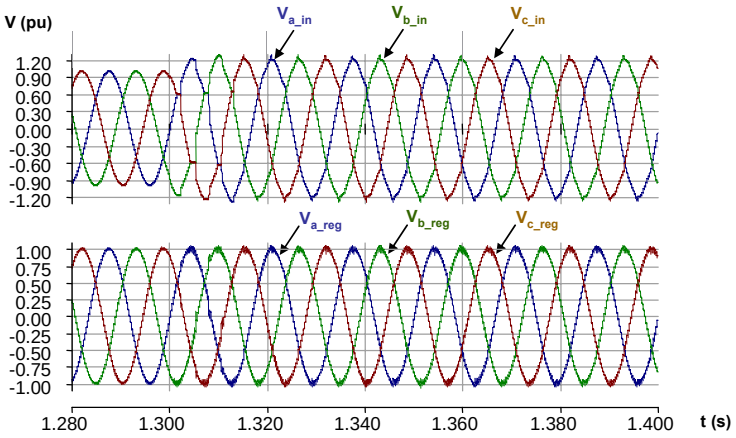
Figura 35 – Tensão de entrada $V_{abc_in}$, tensão de referência de compensação $V_{ref_comp}$ e tensão aplicada no transformador série $V_{abc_trafo}$: (a) RDT e (b) RDTI.

Os gráficos da Figura 35 apresentam a ocorrência de sobre-tensão no sistema. As tensões na entrada apresentam amplitudes na ordem de 1.2 p.u.. Desta forma, o algoritmo de controle detecta a sobre-tensão, gerando referências de compensação em contra fase com a entrada. Esta referência tem o intuito de normalizar a amplitude da tensão na carga, através de injeção através dos transformadores série. Este tipo de compensação, em contra fase, absorve energia ativa da rede para o elo CC. Com isso, a tensão no capacitor tenderia a subir indefinidamente. Contudo, foi projetado um circuito de potencia responsável para evitar tal evento. Em paralelo com o capacitor CC, foi inserido um resistor em série com uma chave. Caso a tensão CC viesse a ser maior que uma dada referência, por exemplo, 350 V esta chave fecha e descarrega a energia excedente no resistor.

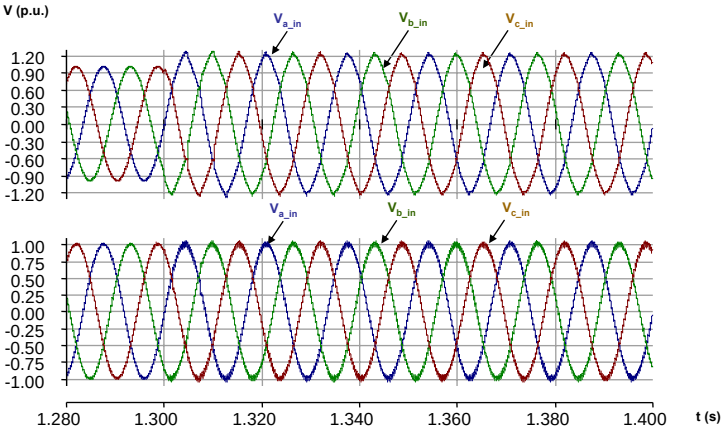
Pode ser observado, que a tensão de compensação além de apresentar a componente responsável pela redução da amplitude da tensão de entrada, é composta por uma parcela de eliminação dos distúrbios elétricos na entrada. Assim, tem-se uma tensão regulada na carga sensível. Novamente, percebe-se um esforço maior da topologia RDTI para realizar a completa compensação da tensão de entrada.

Outro ponto que pode ser destacado é a maior presença de harmônicos de alta

freqüência na tensão injetada pelo transformador do que na tensão de referência. Este fato é explicado devido a uma possível deficiência na filtragem do chaveamento PWM pelo filtro passivo LRC.




(a)




(b)

Figura 36 – Tensão de entrada $V_{abc_in,}$ e tensão regulada na carga $V_{abc_reg}$: (a) RDT e (b) RDTI.

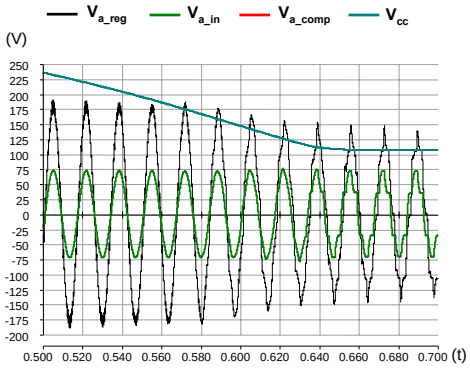
As tensões na barra de entrada e regulada são ilustradas na Figura 36. Ambas as tensões da rede, no RDT e RDTI, têm suas amplitudes máximas em torno 1.2 p.u.. A partir das tensões de compensação ilustradas anteriormente, em regime espera-se manter as tensões reguladas na carga crítica.

Desta forma, pode-se notar que as tensões reguladas permanecem estabilizadas, não sofrendo quaisquer interferências da falta ocorrida na rede. Há presença de harmônicos fruto do chaveamento na barra regulada, contudo livre de distorção harmônica de tensão de

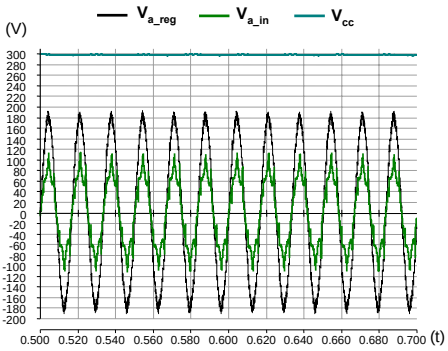
baixa freqüência. Ambos os equipamentos corresponderam à operação frente a uma sobre-tensão no sistema, regulando a tensão de carga.

### d. Afundamento de 60% na tensão nominal da barra de distribuição.

Com o intuito de avaliar o limiar de operação entre as topologias em estudo, foi então simulada uma falta que impactaria um afundamento de 60% na tensão de entrada. Cabe observar a tensão retificada pela ponte a diodos a partir da tensão de linha da rede.




(a)




(b)

Figura 37 – Tensões de linha na entrada e na carga, além da tensão CC, sob um afundamento de 60% na tensão da rede.

Na Figura 37 pode ser notada que o RDT não mantém a tensão CC regulada. Como conseqüência ele perde o seu funcionamento, pois há uma desestabilização do controle a partir de uma tensão retificada muito baixa, em 0,64 ms. Contudo, mesmo na presença de uma tensão na entrada de 0,4 p.u., o RDTI injeta a tensão de compensação no sistema, regulando a tensão de carga, protegendo-a contra a ocorrência de distúrbios na entrada.

## 4.4 Conclusões Parciais

As topologias estudadas neste capítulo apresentaram resultados satisfatórios, dentro do esperado. Os algoritmos de controle propostos desempenharam as suas funcionalidades compensando os distúrbios presentes na rede, como VTCD's, desbalanços e harmônicos de tensão, além de sobre-tensões.

O algoritmo de controle otimizado proposto mostrou-se tão eficiente e robusto quanto o original. Cabe destacar a simplicidade do algoritmo final adotado, o qual aperfeiçoou o funcionamento e minimizou o esforço computacional.

Com a análise preliminar, observou-se o fluxo de potência ao longo do circuito adotado no caso base. Constatou-se que a potência necessária para compensar um mesmo afundamento de tensão na entrada, o RDTI exige uma potência superior à do RDT. Além disso, verificou-se uma potência circulante interna no RDTI.

O RDTI mostrou-se eficiente, corrigindo os distúrbios presentes na barra não regulada. Sua vantagem frente ao RDT está presente no elemento armazenador de energia, o capacitor CC, o qual pode ser bem reduzido com relação ao do RDT. Além disso, mantendo a tensão CC estabilizada favorece a eficiência do algoritmo de controle e sua robustez. Contudo, uma desvantagem fica por conta da potência dos transformadores série que deve ser mais elevada devido ao fluxo da corrente total ser superior ao do RDT. Além da corrente de carga passante pelo transformador também há a corrente drenada pelo retificador.

Os resultados de simulação apresentaram alguns pontos observados no estudo do modelo proposto. Foi detectado um maior esforço da topologia RDTI para realizar a mesma compensação frente a diferentes tipos de faltas. A diferença de corrente que circula no transformador série no RDTI, causa maiores distúrbios na tensão entrada, exigindo uma tensão de compensação de amplitude superior ao do RDT.

Foi mostrado que a tensão CC do elo do RDTI manteve-se regulada durante o evento de falta que afundou a tensão de entrada a 0,6 p.u. A tensão de carga foi compensada. No caso da compensação com o RDT, este perdeu a controlabilidade já a tensão do elo atingiu uma tensão inferior a 125 V.

# CAPÍTULO 5

## TOPOLOGIA SEM FONTE AUXILIAR DE ENERGIA ATIVA

O estudo de uma topologia de compensador série sem fonte auxiliar de energia ativa será o foco principal deste capítulo. Esta topologia é denominada RDTSS (Restaurador Dinâmico de Tensão *Sag–Swell*). Ela difere das anteriores em diversos aspectos, quanto ao circuito de potência, o princípio de operação e o seu controle. A configuração básica do RDTSS é ilustrada na Figura 38.

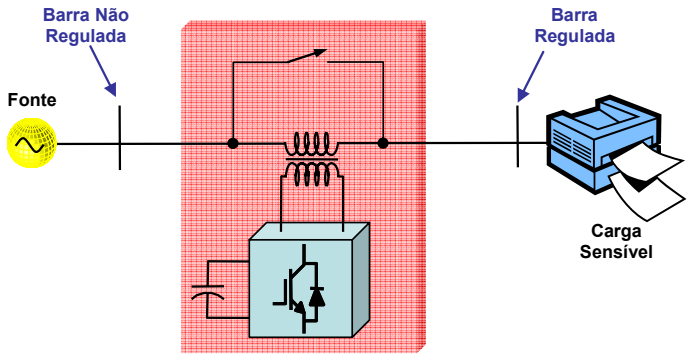



Figura 38 – Configuração básica do RDTSS.

O RDTSS funciona como uma fonte de tensão conectada em série com o sistema, injetando tensões dinamicamente controladas visando suprir uma carga sensível. A tensão é injetada em quadratura com a corrente de carga, supondo as perdas ôhmicas desprezíveis Basicamente o RDTSS injeta reativos na rede visando suprir a ocorrência de faltas.

A topologia do equipamento desenvolvida no simulador é apresentada na Figura 39. Nota-se que estão presentes os transformadores série, o filtro 'LC' e o conversor a IGBT com o capacitor CC.

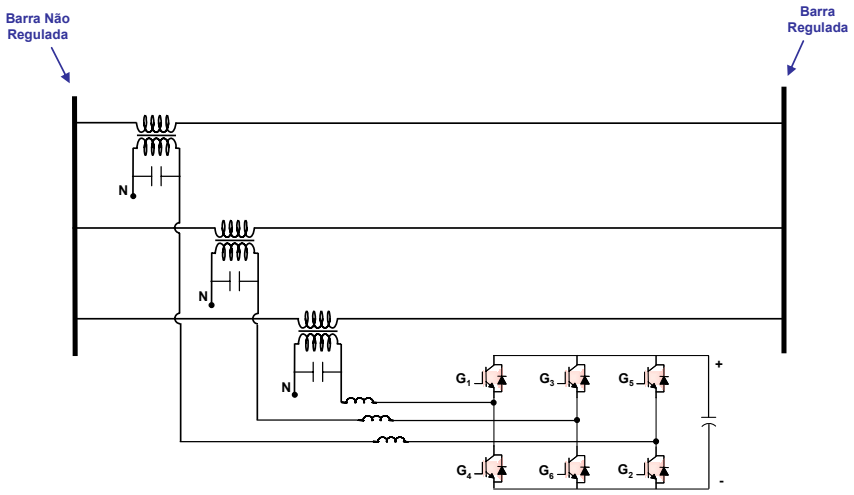



Figura 39 – Diagrama trifilar do RDTSS.

Este capítulo irá abordar o funcionamento do RDTSS, assim como os resultados de simulação obtidos com o modelo proposto.

## 5.1 Princípio de Operação do RDTSS

O RDTSS tem o objetivo de monitorar a tensão de carga e na presença de qualquer distúrbio elétrico injetar uma tensão complementar a fim de manter a carga sensível com uma tensão regulada, sem desbalanços e/ou harmônicos de tensão. Para isso, a partir das medições das tensões de entrada e da barra regulada, o controle calcula a tensão complementar que será injetada no sistema.

A compensação é realizada através da injeção de tensão em quadratura com a corrente de carga, produzindo idealmente apenas potência reativa, o que não causaria variações no elo CC do RDTSS. Contudo, ao sintetizar esta tensão através do chaveamento do conversor, há perdas de energia ativa devido à presença de elementos resistivos, sejam os cabos, filtros ou as chaves semicondutoras.

O elo CC sofre variações de tensão com a drenagem de energia. A reposição é feita através de fluxo de potência ativa, conseguido pela inserção de uma defasagem na tensão de compensação. Dessa forma existirá um fluxo de energia para dentro do conversor, carregando o elo CC. Tal comportamento também é válido quando a tensão do capacitor se encontra acima da tensão de referência, porém o fluxo é contrário, do inversor para a rede.

Assim, a tensão de compensação injetada no sistema tem uma parcela responsável pela regulação da tensão no capacitor CC e outra para estabilizar a tensão de carga frente a distúrbios na entrada. A seguir, na Figura 40, é ilustrado um diagrama fasorial que explica o funcionamento do RDTSS, supondo a ocorrência de afundamentos de tensão.

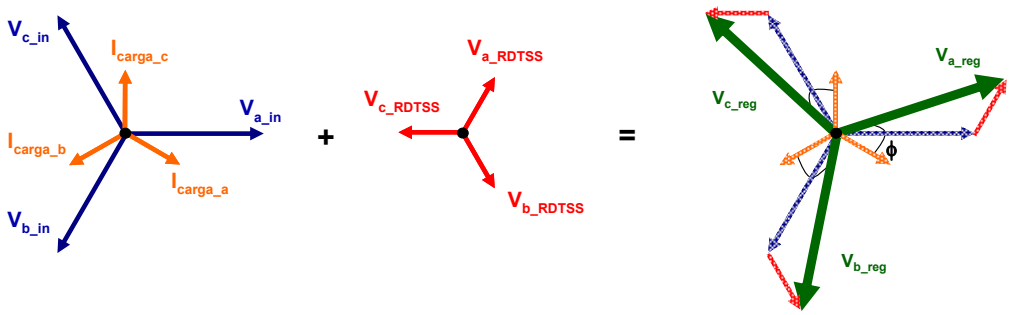



Figura 40 – Diagrama vetorial da operação de um RDTSS contra afundamentos.

É tomada como referência angular a corrente de carga. Considerando uma carga indutiva, o ângulo entre a tensão de carga e corrente, o ângulo '$\phi$', refere-se ao fator de potência da carga. A tensão gerada pelo RDTSS é somada à tensão de entrada, gerando uma tensão resultante na carga. Quanto maior for a tensão de compensação, maior é a abertura angular entre a tensão regulada e a tensão de entrada. Logo, visto pela fonte tem-se uma redução do consumo de reativos (indutivo) pela carga, durante a compensação. Cabe salientar que existem limites para a amplitude desta compensação, visando garantir a estabilidade do equipamento.

O caso estudado foi aplicado a uma carga indutiva. O RDTSS se comporta de duas maneiras para manter a tensão regulada na carga, ora como uma carga capacitiva para aumentar a tensão, ora como uma carga indutiva para diminuir a tensão de entrada em casos de sobre-tensão. Entretanto, ao considerarmos cargas teóricas genéricas como, por exemplo, puramente resistivas e/ou capacitivas há uma nova análise a ser realizada.

Uma carga resistiva impõe uma corrente em fase com a tensão a ela aplicada, resultando em um fator de potência unitário. Contudo, ao inserir a tensão de compensação no sistema, tem-se uma tensão regulada na carga adiantada com relação à barra de entrada, porém em fase com a corrente de carga. Desta forma, visto pela fonte, o fator de potência torna-se capacitivo, implicando um consumo de reativo (capacitivo) que antes não existia. Além disso, ao considerar uma sobre-tensão na entrada, a injeção de tensão pelo RDTSS tenderá sempre a aumentar a tensão de carga, já que a compensação será realizada em quadratura com a corrente de carga e, por conseguinte com a tensão da

entrada.

As cargas capacitivas são caracterizadas por drenar uma corrente adiantada com relação a sua tensão de alimentação. O RDTSS compensa o sistema injetando tensões em quadratura com a corrente de carga. Com isso, a realização de uma compensação tornará o sistema ainda mais capacitivo, pois a tensão resultante estará adiantada com a tensão de entrada, além de implicar em uma tensão de carga de amplitude reduzida. Para este caso, bastaria uma mudança no controle que de forma inteligente identificasse a condição de carga e invertesse o sinal da tensão de compensação. Desta forma, seria possível realizar a compensação desejada. Os diagramas fasoriais ilustrativos na Figura 41, considerando um caso de afundamento de tensão, estão mostrados abaixo.

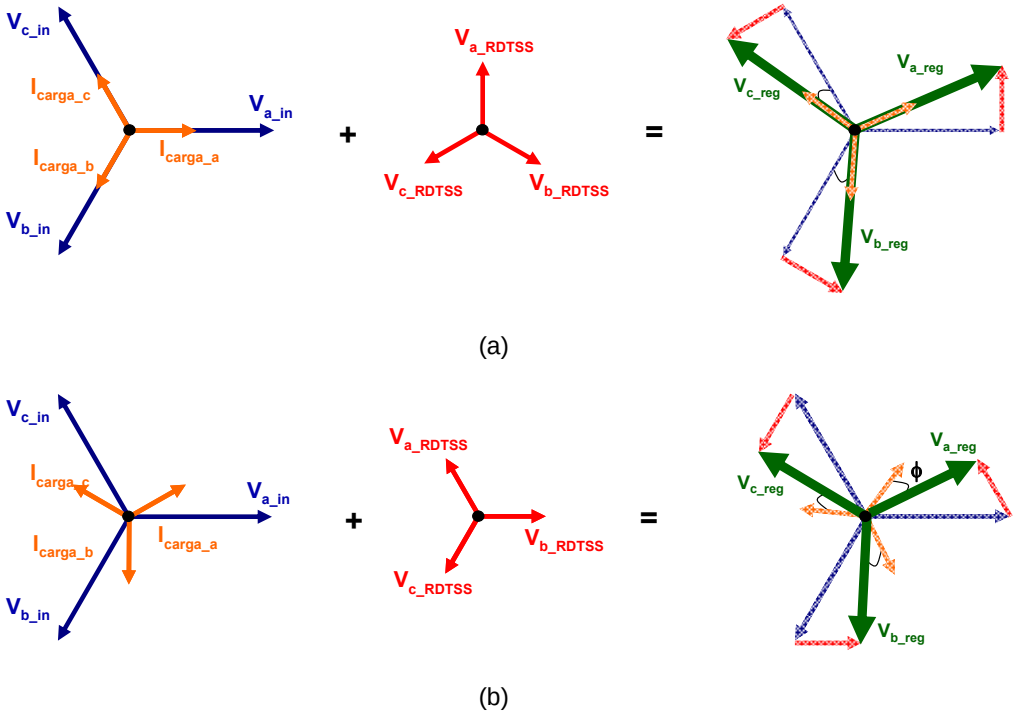



Figura 41 – Diagrama fasorial do funcionamento do RDTSS: (a) uma carga teórica puramente resistiva e (b) uma carga capacitiva.

Assim, a compensação de cargas puramente resistivas e/ou capacitivas não é evidente. Contudo, a grande maioria das cargas presentes no sistema elétrico é indutiva. Mesmo assim, é de grande valia o tratamento dado às cargas especiais visando aperfeiçoar o controle desenvolvendo adaptações que generalize à aplicação do equipamento. O item a seguir apresenta o algoritmo de controle e simulações para validar teoricamente este modelo.

## 5.2 Controle do RDTSS

O controle do RDTSS é baseado no algoritmo utilizado no RDT e no RDTI. A diferença é que além da obtenção das tensões de entrada $V_{ab_in}$ e $V_{bc_in}$ e da barra regulada $V_{ab_reg}$ e $V_{bc_reg}$, também é necessário obter a tensão $V_{CC}$ no capacitor CC. Este aspecto irá impactar em mais um módulo no algoritmo de controle chamado de regulação do capacitor CC.

Este controle também utiliza a transformação de tensões de linha para tensões de fase, conforme descrito no capítulo anterior. Este bloco tem a finalidade de reduzir os pontos elétricos de medição externa, visando obter valores de tensão de fase para o algoritmo. A tensão base de referência do controle foi considerada o valor de pico da tensão fase-neutro que vale 179,6 V.

Primeiramente, após a leitura das tensões estas são normalizadas a partir da tensão base. Em seguida, as tensões $V_{abc_in}$ são utilizadas como entrada para o sincronismo do controle realizado pelo algoritmo do PLL. A medição da tensão injetada pelo transformador série $V_{abc_trafo}$ é resultado da comparação da tensão da barra regulada e da barra de entrada ($V_{abc_reg} – V_{abc_in}$), considerando a referência de gerador e não de carga.

A tensão desejada na carga é puramente senoidal de seqüência positiva, livre de harmônicos/desbalanços de tensão. Para isso, a variável de saída do PLL ‘ωt’ é somada com a defasagem de um ângulo ’γ’ e aplicada em um gerador de senos fornecendo a tensão de referência $V_{ref}$. A Figura 42 ilustra o controle citado.

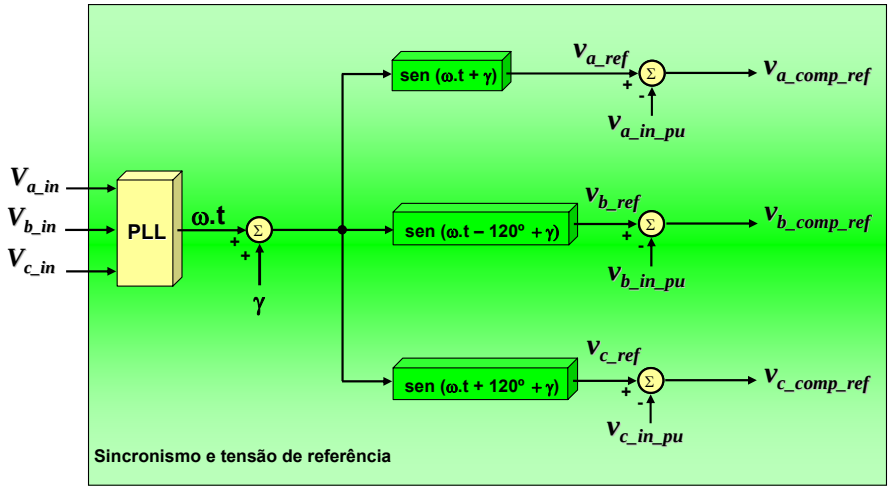



Figura 42 – Controle: Cálculo da tensão de referência a partir da saída do PLL e do ângulo delta de regulação CC.

O módulo de regulação CC é muito simples. Ele é baseado na comparação da referência de tensão desejada no capacitor com a tensão medida. O erro passa por um controlador proporcional–integral (PI) gerando assim o ângulo 'γ'. Supondo inicialmente que a tensão medida $V_{CC}$ é menor que a referência desejada, tem-se um erro positivo. Uma entrada positiva no controlador acarreta um sinal de amplitude superior, aumentando o ângulo e viabilizando o aumento da tensão $V_{CC}$, em direção à referência. Quanto maior o ângulo da tensão de referência, maior é a potência ativa drenada da rede para o conversor. Este controlador possui limitadores internos com a finalidade de aperfeiçoar a sua resposta, sendo 0.7 (radianos) os limites inferior e superior. Os ganhos utilizados foram: 30,0 para a parte proporcional e constante de tempo de 0,5 ms para o integrador. Abaixo, na Figura 43, é ilustrado o controle do elo CC.

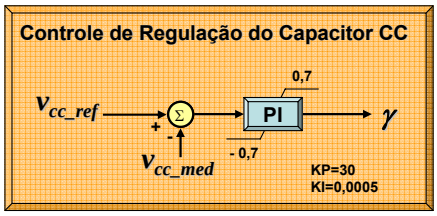



Figura 43 – Controle: Regulação do capacitor CC.

A tensão de referência de compensação $V_{abc_ref_comp}$ é proveniente da comparação da tensão de referência $V_{abc_ref}$ e da tensão de entrada $V_{abc_in}$. Em seguida, a tensão de referência do PWM $V_{abc_PWM}$ é resultante da comparação da tensão de referência de compensação $V_{abc_ref_comp}$ e da tensão medida no transformador $V_{abc_trafo}$ que passa por um controlador PI. Caso a tensão no transformador seja inferior à referência calculada, o erro positivo no controlador PI aumentará a tensão de referência do PWM, tendendo a igualar a tensão no transformador com a desejada. Os limites superior e inferior do PI estão limitados a +/- 1,0, evitando uma possível sobre-modulação no chaveamento PWM. Os ganhos utilizados foram KP=3,0 e KI=0,5 ms. A Figura 44 mostra este controle de chaveamento.

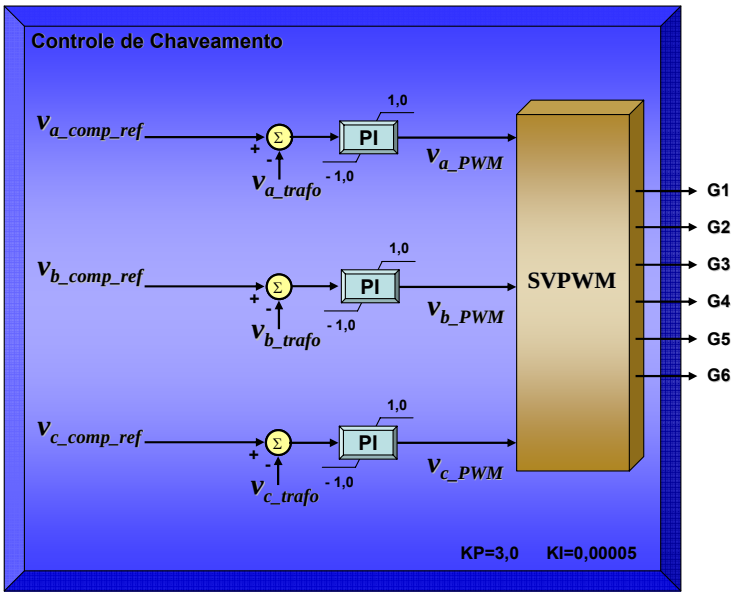



Figura 44 – Algoritmo de controle do chaveamento do RDTSS.

A partir da tensão de referência do PWM Vabc_PWM esta será comparada com a portadora triangular para gerar o sinal PWM. Com os pulsos determinados, é então realizado o comando de cada chave do conversor.

Observa-se que a estrutura é muito parecida com a utilizada no capítulo anterior, salvo o controle do elo CC. Em seguida são apresentados os resultados obtidos com a simulação de um caso base na qual o RDTSS foi inserido.

## 5.3 Simulação das Topologias

A simulação foi baseada no modelo digital do RDTSS aplicado a uma rede de distribuição onde estão presentes duas cargas genéricas. Foi definida uma carga “RL” protegida pelo compensador série e uma segunda caracterizada por uma ponte completa não controlada em paralelo com uma carga resistiva. A fonte de harmônicos foi simulada através de uma ponte a diodos conectada em paralelo com o sistema. A ponte é a carga não protegida e geradora de harmônicos.

Com o intuito de comparar a operação desta topologia com as expostas no capítulo anterior, o RDT e o RDTI, foram utilizados os mesmos parâmetros do cenário da simulação realizada, salvo a topologia do conversor do RDTSS. Para facilitar o acompanhamento, os parâmetros utilizados na simulação estão apresentados na Figura 45. O bloco que representa o desbalanço da rede é idêntico ao utilizado no capítulo anterior.

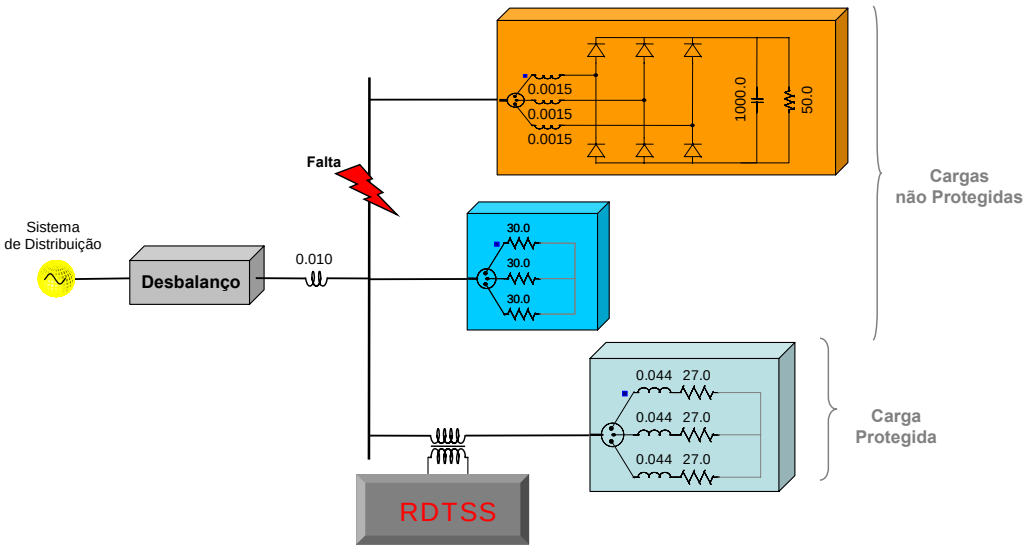



Figura 45 – Diagrama do circuito implementado no PSCAD.

No item a seguir serão apresentados os resultados da simulação computacional do RDTSS. Será avaliado comportamento do equipamento frente à presença de distúrbios elétricos na tensão da barra de entrada.

### 5.3.1 Resultados de Simulação

O funcionamento do algoritmo de controle proposto foi comprovado através dos resultados obtidos com a simulação do modelo digital. São ilustradas as formas de onda que demonstram o comportamento das variáveis de controle e das respostas operacionais da topologia do RDTSS frente a diferentes distúrbios no sistema elétrico.

**a. VTCD de 10% na tensão nominal da barra de distribuição (em 0,4 s);**

O primeiro caso a ser avaliado é o funcionamento do RDTSS sob afundamentos de tensão de curta duração. Com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo digital, foi simulada uma falta trifásica a 0.9 p.u. durante 200ms.

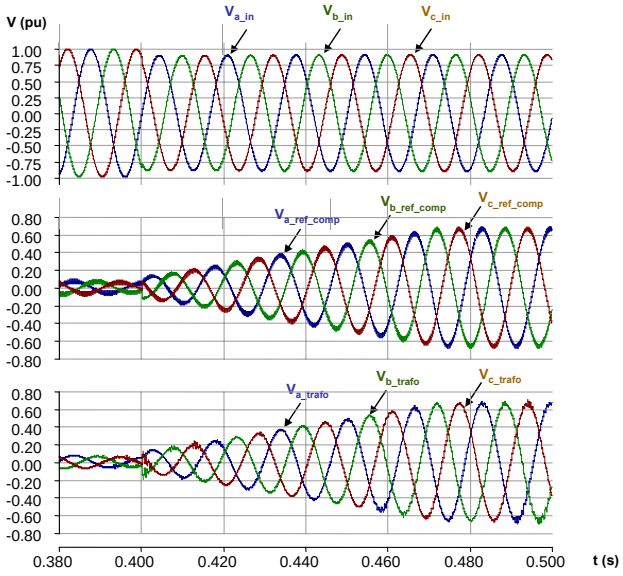



Figura 46 – Tensão de entrada $V_{abc_in}$, tensão de referência de compensação $V_{ref_comp}$ e tensão aplicada no transformador série $V_{abc_trafo}$.

Na Figura 46, a partir de 0.4 ms há a ocorrência de um afundamento que leva a tensão na entrada, e consequentemente a regulada, a 0.9 p.u. de amplitude. Pode ser notado que a referência calculada pelo controle é seguida pela tensão aplicada nos transformadores monofásicos. A dinâmica lenta observada deve-se a interação entre as variáveis do controle que além gerar uma tensão de compensação do afundamento, também é responsável por regular a tensão no capacitor CC. Cabe ressaltar que a amplitude da tensão de compensação é de 0.6 p.u. para corrigir apenas um afundamento a 0.9 p.u. na entrada.

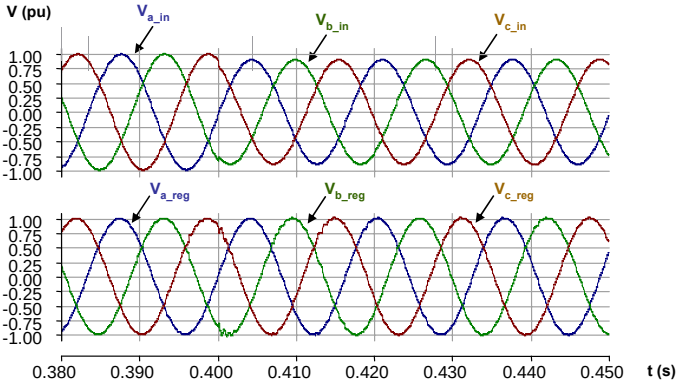



Figura 47 – Tensão de entrada $V_{abc_in}$ e a tensão regulada na carga $V_{abc_reg}$.

A partir das tensões aplicadas nos transformadores série é realizada a compensação do sistema. A Figura 47 ilustra a tensão na barra de entrada e na regulada. Observa-se que mesmo na presença de uma tensão de 0.9p.u. na entrada, a tensão na carga é mantida regulada em 1,0 p.u., demonstrando o funcionamento do RDTSS. Como não há a presença da ponte a diodos para suprimento de energia, a tensão na entrada não sofre distorções devido a presença de harmônicos de baixa freqüência. A resposta observada foi praticamente instantânea, garantindo a eficácia da topologia quanto ao tempo de atuação.

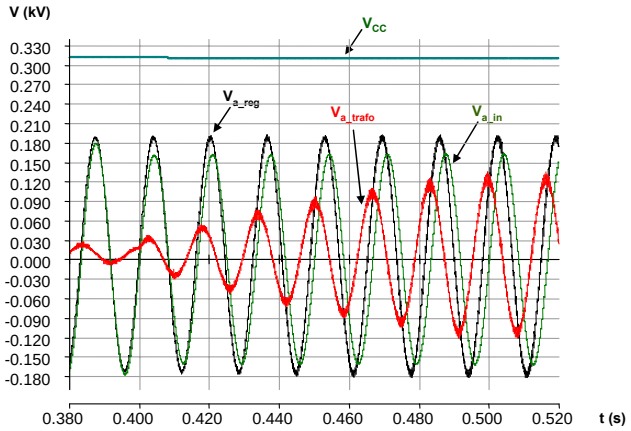



Figura 48 – Tensão de entrada $V_{a_in}$, tensão regulada na carga $V_{a_reg}$, tensão no transformador $V_{a_trafo}$ e tensão do capacitor CC $V_{CC}$.

A Figura 48 mostra a tensão na fase ‘a’ na barra de entrada, na carga e a injetada na rede, além da tensão CC no capacitor. A tensão $V_{abc_trafo}$ está inicialmente em quadratura com a corrente de carga garantindo fluxo de reativos, porém em regime há também um fluxo de potência ativa para suprir a tensão do capacitor CC, deslocando de um ângulo ‘δ' a tensão de compensação. Cabe salientar uma desvantagem desta topologia, que para um afundamento de 10% o RDTSS necessita gerar uma tensão de compensação de 0.6 p.u. para regular a tensão na carga. Pode ser verificado que o módulo de controle da tensão CC funcionou como esperado, mantendo o capacitor CC regulado durante a compensação.

**b. Desbalanço de tensão de 10% na tensão nominal da barra de distribuição (em 0,7s);**

Foi simulado um desbalanço de 10% de seqüência negativa. Através de transformadores monofásicos somou-se às tensões da rede ABC, 10% de $V_{a_in}$ na fase ‘a’, 10% de $V_{c_in}$ na fase ‘b’ e 10% de $V_{b_in}$ na fase ‘c’.

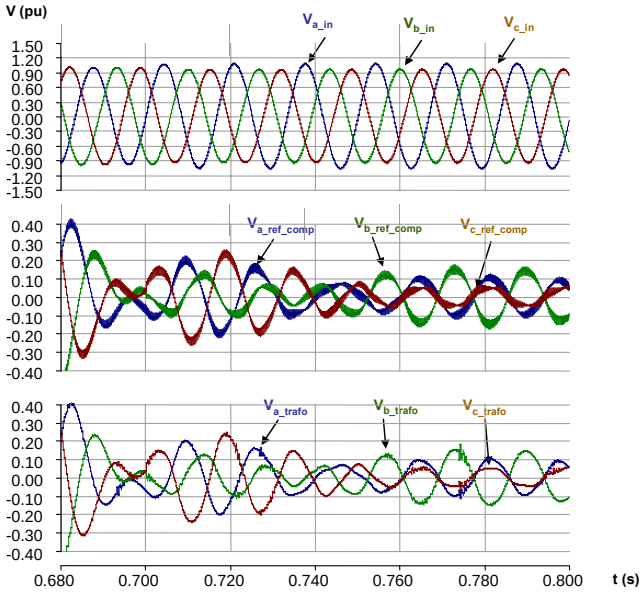



Figura 49 – Tensão de entrada $V_{abc_in}$, tensão de referência de compensação $V_{ref_comp}$ e tensão aplicada no transformador série $V_{abc_trafo}$.

Os gráficos acima, na Figura 49, ilustram o desbalanço de tensão proposto. A tensão de referência calculada pelo controle está mostrada no gráfico do meio, com uma amplitude um pouco maior que 0,1 p.u.. As tensões aplicadas nos transformadores monofásicos representaram fielmente a referência, apresentando uma tensão filtrada com relação às altas freqüências. Este fato deve-se ao amortecimento das oscilações pelas indutâncias e capacitâncias presentes no circuito de potência.

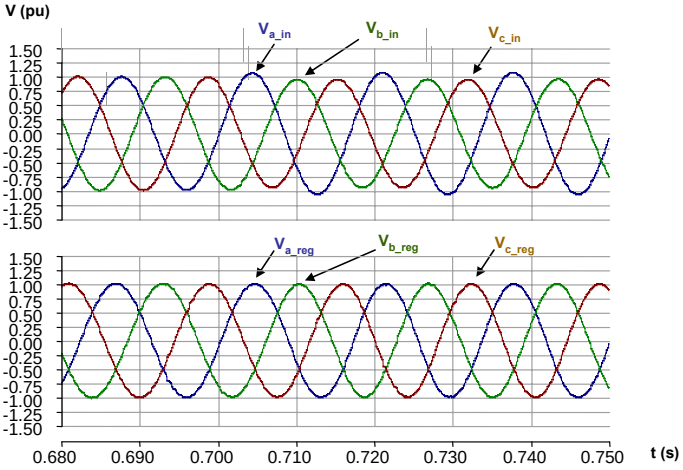



Figura 50 Tensão de entrada $V_{abc_in}$ e a tensão regulada na carga $V_{abc_reg}$.

As tensões na barra de entrada e na barra regulada estão mostradas na Figura 50. Percebe-se o desbalanço de tensão na tensão da rede, porém na carga a tensão é mantida estabilizada em 1,0 p.u. de amplitude, livre dos distúrbios elétricos. A resposta da compensação é rápida mantendo a tensão de carga estabilizada mesmo durante o transitório ocorrido após 0,7 s.

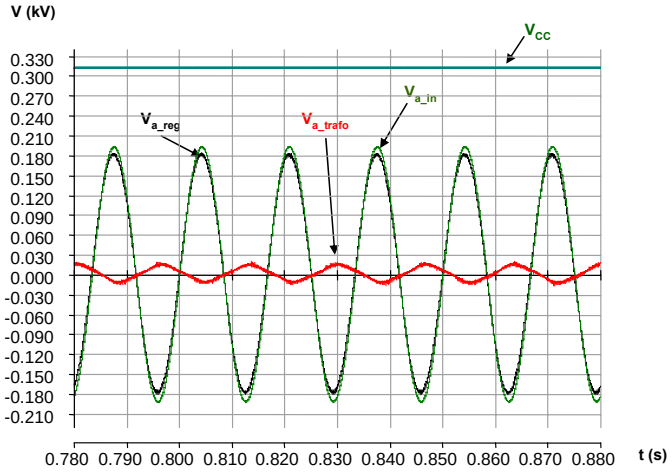



Figura 51 – Tensão de entrada $V_{a_in}$, tensão regulada na carga $V_{a_reg}$, tensão no transformador $V_{a_trafo}$ e tensão do capacitor $V_{CC}$.

Como mostrado na Figura 51, devido ao desbalanço a fase ‘a’ apresentou uma amplitude acima da nominal, em torno de 1,1 p.u.. Com isso, a tensão de compensação injetada no sistema deve estar em quadratura com a corrente de carga, porém atrasada, com o intuito disponibilizar uma tensão com amplitude unitária à carga. Acima pode ser observado que a tensão de entrada é compensada, estabilizando a carga com uma tensão em 1,0 p.u. A tensão do capacitor permaneceu regulada em 1.0 p.u. durante o evento de falta.

### c. Inserção de cargas não lineares no sistema (em 1.0 s).

Com o intuito de observar a resposta do equipamento frente a harmônicos de tensão, foi inserida uma carga não linear no sistema. Com a indutância de linha, a passagem desta corrente de carga irá distorcer a tensão na entrada.

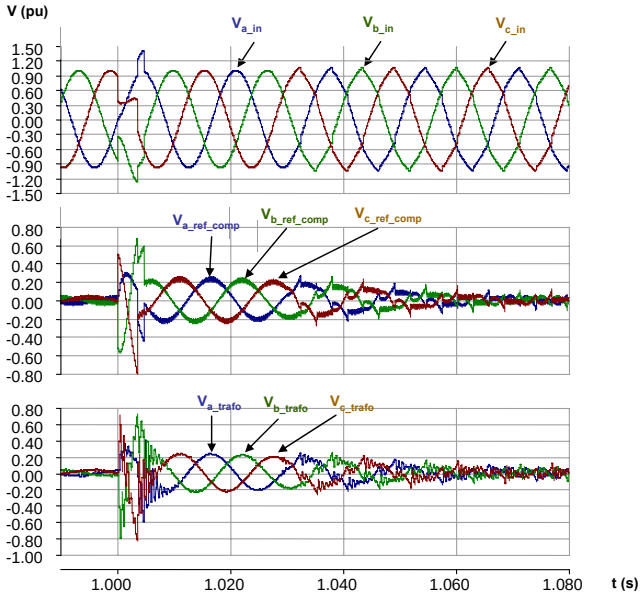



Figura 52 – Tensão de entrada $V_{abc_in}$, tensão de referência de compensação $V_{ref_comp}$ e tensão aplicada no transformador série $V_{abc_trafo}$.

A tensão na entrada apresenta uma forma distorcida devido a harmônicos de de baixa freqüência, ilustrado na Figura 52. A referência de compensação calculada apresenta um transitório, atingindo em regime uma amplitude em torno de 0,1 p.u.. A tensão injetada pelo transformador apresenta uma forma de onda semelhante à referência.

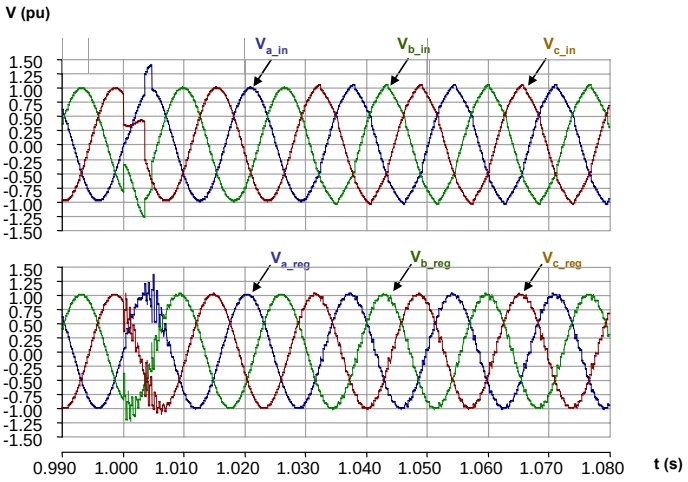



Figura 53 – Tensão de entrada $V_{abc_in}$ e a tensão regulada na carga $V_{abc_reg}$.

O gráfico da Figura 53 apresenta a tensão regulada na carga e a tensão na rede. Pode ser notado que mesmo na presença de uma tensão distorcida na entrada, a tensão na carga se mantém estabilizada, com amplitude unitária e livre de distúrbios elétricos. Contudo percebe-se um ruído de alta freqüência e baixa amplitude na tensão de carga, fruto do chaveamento em alta freqüência do conversor e não filtrada completamente pelo filtro 'LC'. Com a inserção da carga não linear no sistema em 1,0 s, há uma pequena distorção fruto do carregamento do capacitor CC desta carga, não mais presente na seqüência do evento.

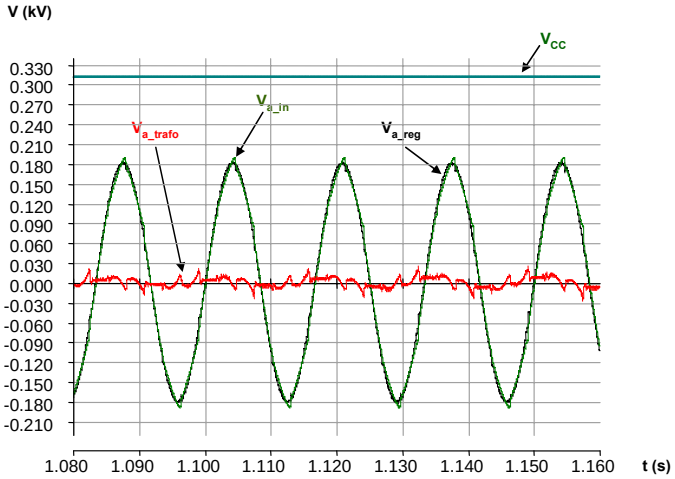



Figura 54 – Tensão de entrada $V_{a_in}$, tensão regulada na carga $V_{a_reg}$, tensão no transformador $V_{a_trafo}$ e tensão do capacitor CC $V_{CC}$.

As tensões referentes à fase 'a' na barra de entrada, na regulada e de compensação, além da tensão no capacitor CC são ilustradas na Figura 54. Observa-se que a tensão de compensação em detalhe apresenta harmônicos de baixa freqüência e em contra-fase com o intuito de eliminar os distúrbios gerados pela presença de carga não linear no sistema. A tensão da carga é mantida estabilizada em 1,0 p.u.. A tensão CC mantém-se regulada durante a compensação.

### d. Sobre tensão de 20% na tensão nominal da barra de distribuição.

Foi simulada uma falta no sistema através de uma sobre-tensão de 20%. Esta condição de falta não é muito comum no sistema elétrico de distribuição, porém é um caso extremo para o conversor realizar a compensação. Os gráficos abaixo ilustram a resposta do RDTSS.

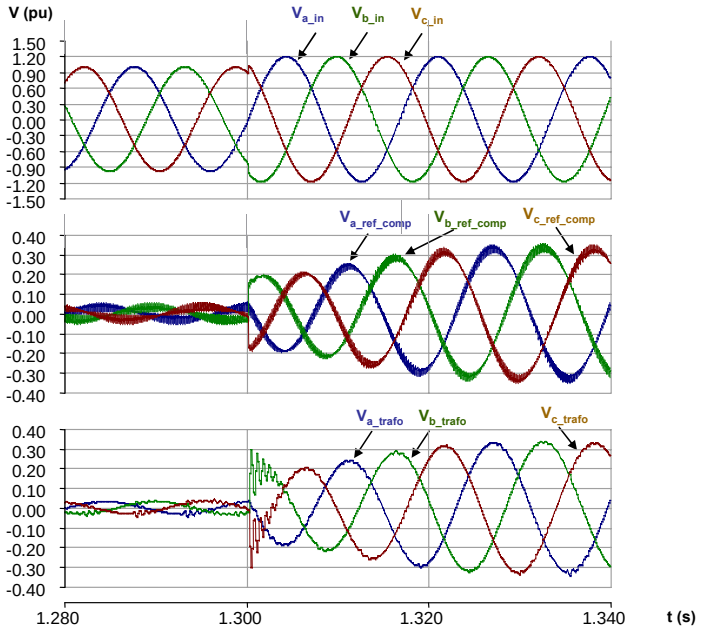



Figura 55 – Tensão de entrada $V_{abc_in}$, tensão de referência de compensação $V_{ref_comp}$ e tensão aplicada no transformador série $V_{abc_trafo}$.

Frente a uma sobre-tensão no sistema, o RDTSS irá injetar tensões de compensação atrasadas com a corrente de carga, com objetivo de atenuar a tensão de entrada mantendo a tensão de carga em 1 pu. Percebe-se que a tensão de referência calculada foi seguida pela injeção de tensão nos transformadores monofásicos, conforme a Figura 55. Pode ser notado também que a tensão de referência apresenta uma dinâmica mais lenta, atingindo o regime depois de alguns milisegundos. Este fato é conseqüência da interação da amplitude necessária de compensação e o ângulo '$\delta$' que regula a tensão CC. Ambas as variáveis impactam diretamente no fluxo de potência ativa e reativa do sistema, necessitando-se de um transitório até estabilizar a tensão de compensação.

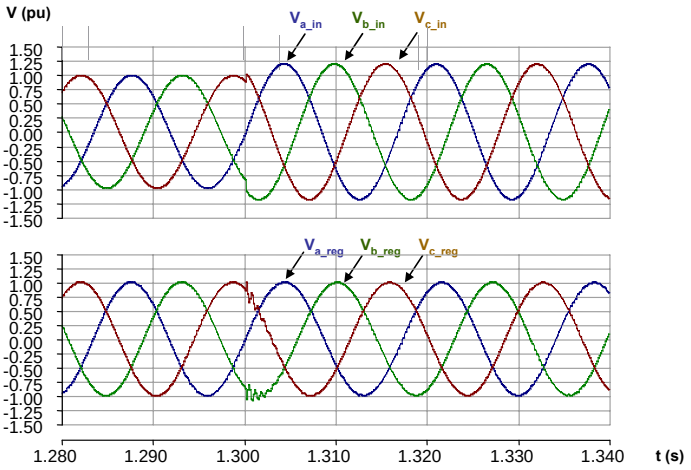



Figura 56 – Tensão de entrada $V_{abc_in,}$ e tensão regulada na carga $V_{abc_reg}$.

A tensão de entrada e da barra regulada na presença de sobre-tensão estão ilustradas na Figura 56. Percebe-se que a tensão da entrada apresenta amplitudes de 1,2 p.u., porém a tensão na carga é mantida regulada em 1,0 p.u. com a compensação do RDTSS. A tensão regulada apresenta um pequeno transitório em torno de 50 ms, estabilizando em seguida.

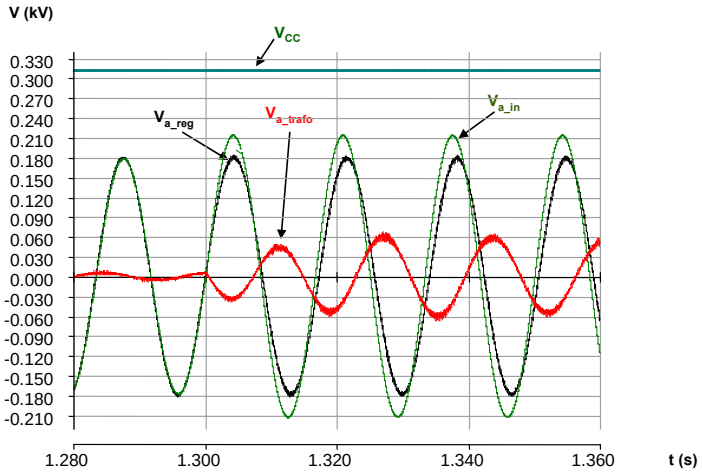



Figura 57 – Tensão de entrada $V_{a_in}$, tensão regulada na carga $V_{a_reg}$, tensão no transformador $V_{a_trafo}$ e tensão do capacitor CC $V_{CC}$.

O gráfico da Figura 57 ilustra as tensões na barra de entrada, na regulada e de compensação na fase ‘a’. Percebe-se que a compensação é realizada em quadratura,

porém atrasada, simulando uma carga indutiva ao sistema com intuito de diminuir a tensão de entrada para a carga. Cabe salientar que para compensar uma sobre-tensão de 20% na entrada o RDTSS teve que injetar uma compensação de aproximadamente 0.3 p.u. de amplitude. Durante o evento a tensão do capacitor CC manteve-se regulada.

## 5.4 Conclusões Parciais

Mesmo sem a ponte a diodos como fonte de energia ativa para o capacitor CC, o RDTSS manteve a tensão CC regulada em todos os casos de falta simulados. O algoritmo de controle da tensão CC apresentado é simples e robusto, exigindo baixo esforço computacional. O controle global é muito semelhante ao utilizado nas topologias anteriores, salvo pelo controle da tensão do capacitor CC.

Os resultados computacionais obtidos comprovaram o funcionamento do mesmo. Cabe destacar que a dinâmica do controle é afetada pela regulação de duas grandezas ao mesmo tempo, como a potência ativa e reativa injeta/consumida da rede. Contudo, ele apresentou um desempenho satisfatório, compensando VTCD's, desbalanço e harmônicos de tensão, além de sobre tensões. Contudo, para regular afundamento na ordem de 10% e sobre-tensão de 20%, foi necessária a injeção de tensão de 0.6 p.u. e 0,3 p.u. de amplitude, respectivamente.

# CAPÍTULO 6

## ANÁLISE OPERACIONAL DOS PROTÓTIPOS DO RDT E DO RDTI

Neste capítulo serão abordados os resultados operacionais obtidos em bancada das topologias implementadas do RDT e do RDTI. Esta etapa tem o objetivo de comprovar os fundamentos teóricos pesquisados na etapa de concepção do algoritmo de controle e simulação digital no PSCAD do modelo adotado. Cabe ressaltar que não foi desenvolvido o protótipo do RDTSS fato justificado pelo desempenho inferior ao do RDT e RDTI. Contudo este estudo será abordado em trabalhos futuros.

O protótipo laboratorial de testes foi desenvolvido no laboratório de Eletrônica de Potência da COPPE/UFRJ – ELEPOT. Ambas as topologias foram montadas no mesmo protótipo (bancada). A seleção é feita através de uma chave seletora que posiciona a ponte a diodos no seu devido ponto de derivação. A ilustração do protótipo esta na Figura 58.

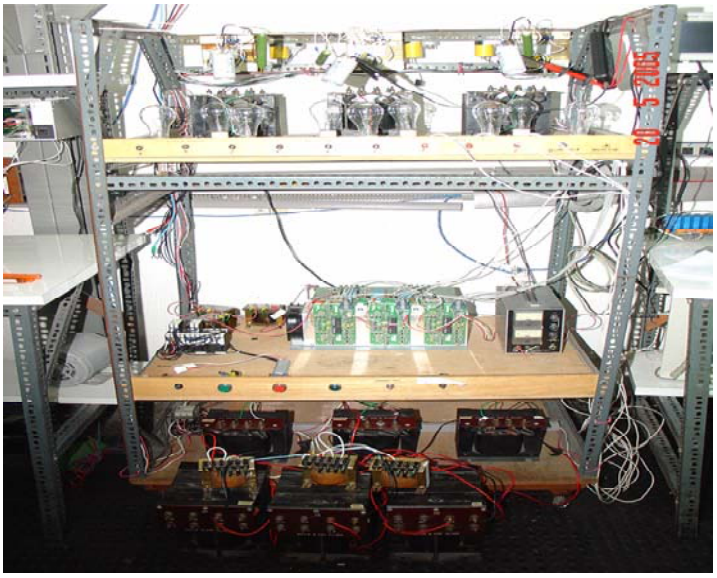


Figura 58 – Protótipo de compensador série de tensão desenvolvido no ELEPOT.

Com o objetivo de aplicar os conhecimentos oriundos do modelo digital obtido, foi montado o protótipo em bancada, simulando uma rede de distribuição, com cargas diversas, reatância de linha, ocorrência de faltas, entre outros. As características técnicas do protótipo são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características técnicas do protótipo desenvolvido:

| | | |
|---|---|---|
| **PARÂMETROS DO SISTEMA ELÉTRICO** | | |
| Tensão nominal de linha | V_fonte | 220 V |
| Tensão base do sistema | V base | 179,60 V |
| Freqüência | f | 60 Hz |
| Indutância da linha | L_fonte | 10 mH |
| **PARÂMETROS DA CARGA SENSÍVEL** | | |
| Potência da Carga | P | 2 kVA |
| Resistência | R_carga | 27 Ω |
| Indutância | L_carga | 44 mH |
| **PARÂMETROS DO CONVERSOR DO RDT E RDTI** | | |
| Indutor de alisamento do retificador | L_ret | 1.5 mH |
| Capacitor do elo CC (RDT) | C_inv | 4700 μF |
| Reator do filtro | L_filtro | 1.5 mH |
| Capacitor do filtro | C_filtro | 20 μF |
| Freqüência de chaveamento | F_sw | 7680 Hz |
| **TRANSFORMADOR SÉRIE** | | |
| Indutância de dispersão | Ls | 2 mH |
| Relação de espiras | | 1:1 |
| Potência | $P_t$ | 2.5 kVA |
| **PARÂMETRO DA CARGA RESISTIVA** | | |
| Resistor | R | 30 Ω |
| **PARÂMETRO DA CARGA DE FALTA** | | |
| Indutor | $L_{af}$ | 44mH |

O sistema foi projetado para operar a uma tensão de linha de 220 V em 60Hz. A carga protegida foi montada a partir de um reator de 44mH e lâmpadas incandescentes de 500W/127V, ligados em estrela. Com o intuito de simular uma falta no sistema de entrada, foi inserido um reator de 44mH em paralelo com a carga crítica. Uma carga resistiva de 30 Ω também foi inserida em paralelo para simular uma carga não protegida. Na fonte foi colocada um Variador de ensão AC (Variac) para aplicar uma sobre-tensão na entrada. Destaca-se também o circuito de desbalanço de tensão através de transformadores monofásicos com relação de transformação de 1:1. O diagrama unifilar da montagem do equipamento é mostrado na Figura 59.

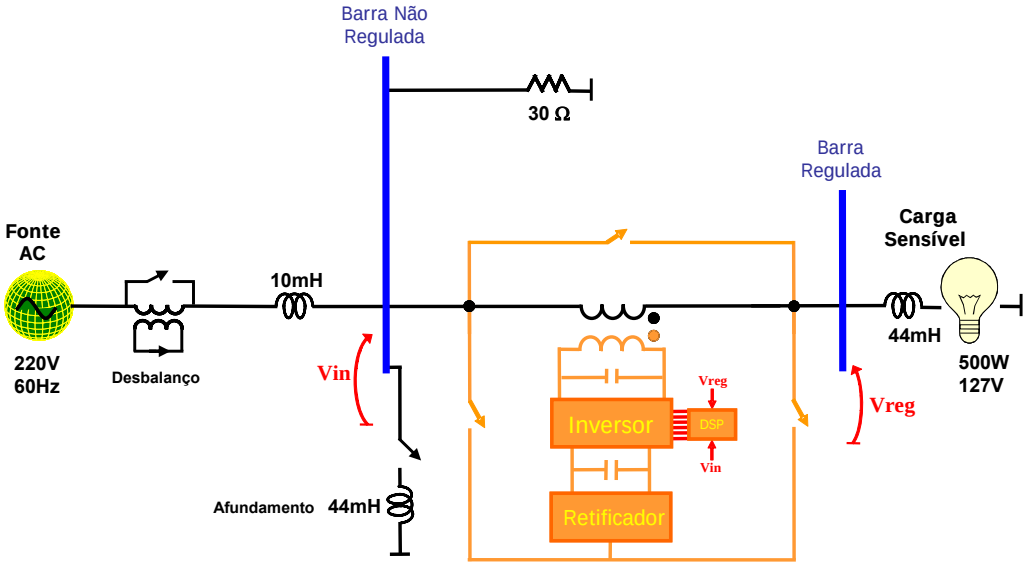



Figura 59 – Diagrama unifilar dos protótipos desenvolvidos no Laboratório de Eletrônica de Potência.

Cabe ressaltar que na implementação prática não foi utilizado o resistor no filtro de chaveamento PWM. Foi observado ao longo dos testes que na presença do elemento resistivo a tensão de carga apresentava uma distorção harmônica significativa. Logo, o filtro utilizado a partir do reator e capacitor, juntamente com as indutâncias e capacitâncias parasitas do circuito montado apresentaram um resultado superior. Contudo, como será visto nos próximos itens, as componentes do chaveamento não foram completamente eliminadas, estando presentes na tensão de carga.

No item a seguir serão apresentados os resultados operacionais obtidos com o protótipo desenvolvido.

## 6.1 Resultados Experimentais do RDT e do RDTI

O protótipo foi controlado pelo DSP da *Texas Instruments* modelo xx2407, de 16 bits, *clock* de 30 MHz e AD de 10bits. Para a obtenção das formas de onda foi utilizado o osciloscópio da *Tektronix* modelo TPS 2014, com o programa de interface com o computador chamado de *Open Choice*.

Todo o controle proposto modelado no simulador PSCAD foi digitalizado e implementado no DSP. A transposição do código exige que sejam realizadas algumas alterações, pois o DSP utilizado opera internamente em ponto fixo enquanto o computador em ponto flutuante. Para tanto, tais modificações implicam em diferentes valores para os ganhos dos controladores.

Os ganhos utilizados no controlador PI do algoritmo de controle do PLL foram KP=50 e KI=0.0002, com limitadores superior e inferior na saída em 0,5 e 1,5 respectivamente. Além do PLL, o controle de chaveamento dispõe de controladores PI, com os seus ganhos KP=3.0 e KI=0.0003, e limitadores em =/- 0,99.

Serão ilustradas a seguir as formas de onda resultantes da operação de cada topologia frente à faltas na rede como VTCD, harmônicos, desbalanços de tensão e sobre-tensão. Por fim, para validar os testes realizados no simulador, será avaliado o desempenho das topologias frente um afundamento trifásico a 0,6 p.u..

### 6.1.1 O RDT

#### a. Ocorrência de VTCD de 20%:

O VTCD foi aplicado com a inserção do reator de afundamento de 44 mH em paralelo com a carga sensível. Logo, foi provocada uma falta a 0.8 p.u. na barra de entrada. A figura abaixo ilustra o comportamento das tensões de entrada e regulada após o evento.

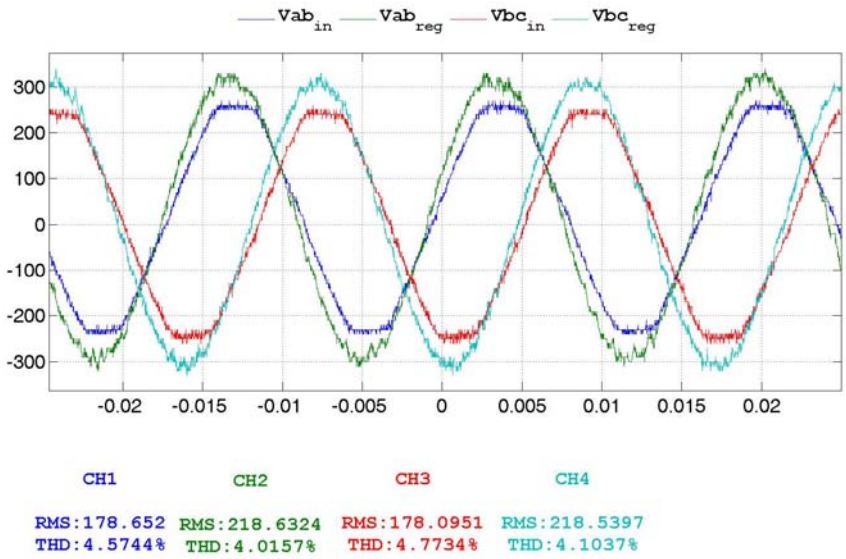



Figura 60 – Formas de onda na barra de entrada e regulada após a ocorrência de um VTCD e a compensação do RDT.

Após a falta (VTCD), na Figura 60 a forma de onda da tensão de entrada $V_{ab_in}/V_{bc_in}$ apresenta um afundamento com relação ao seu valor nominal a aproximadamente 178 V. Com a compensação do RDT, a tensão regulada $V_{ab_reg}/V_{bc_reg}$ assume 218 V de amplitude, ou seja, uma compensação em torno de 44 V correspondendo a 20% da tensão de linha. Pode ser notado que a tensão de entrada está deformada devido à presença de harmônicos de baixa freqüência provenientes da corrente drenada pela ponte a diodos. As tensões reguladas apresentam uma forma de onda que contém harmônicos de alta freqüência oriundos do chaveamento do conversor, porém com amplitudes muito próximas da nominal. Dessa forma, além da compensação do VTCD, observou-se a compensação de harmônicos realizada pelo equipamento. Mesmo assim, o THD das tensões ficou próximo de 4,7% na entrada e 4,1% na regulada.

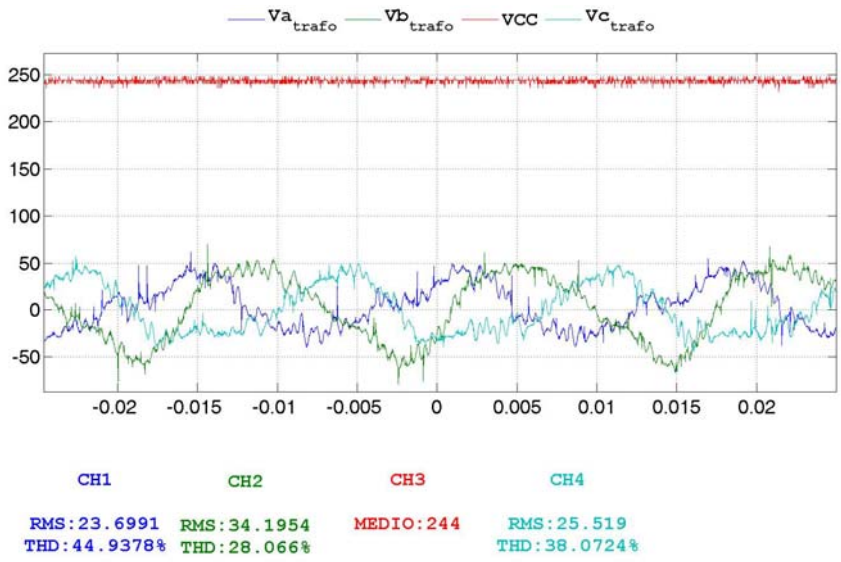



Figura 61 – Tensões de compensação aplicadas no transformador série do RDT.

A Figura 61 apresenta as tensões de compensação aplicada ao transformador série, que será somada à tensão da barra de entrada e a tensão do elo CC durante a compensação. Pode ser notado que as tensões monofásicas aplicadas apresentam uma forma de onda muito distorcida, com THD acima de 28% para a fase 'b' e acima de 38% para as demais fases. Tal fato é explicado devido à presença de harmônicos de baixa freqüência para a compensação da tensão distorcida na entrada e harmônicos de alta freqüência oriundos do chaveamento. Tais tensões têm amplitudes máximas em torno de 50 V. Como o retificador do RDT está conectado na barra de entrada, a amplitude média da tensão retificada sofre uma diminuição permanecendo próxima de 244 V durante a ocorrência da falta.

**b. Ocorrência de Desbalanços de Tensão de 7%:**

Com o intuito de avaliar o desempenho do RDT, foi provocado um desbalanço na tensão de alimentação do sistema na ordem de 7%. Com isso, a tensão $V_{ab_in}$ chegou a 235 V, enquanto a $V_{bc_in}$ registrou 200 V de amplitude RMS. A Figura 62 ilustra o comportamento das tensões durante a ocorrência da falta.

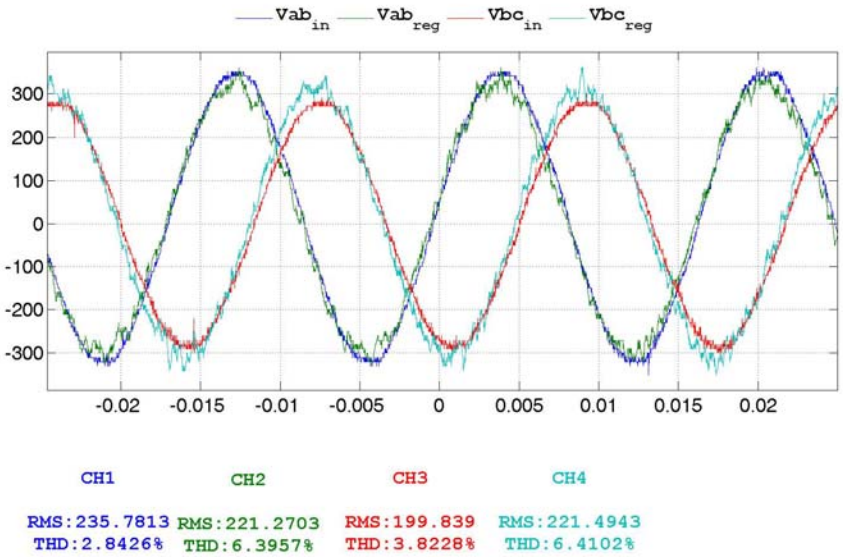



Figura 62 – Tensões de linha na entrada e na barra regulada com a compensação do RDT em situação de sobre–tensão.

A Figura 62 apresenta as tensões de linha presentes no sistema. Percebe-se que as tensões $V_{ab_in}$ e $V_{bc_in}$ estão desbalanceadas, com os seus valores nominais diferentes da nominal 220 V. Contudo as tensões $V_{ab_reg}$ e $V_{bc_reg}$ mantêm os valores muito próximos dos nominais em torno de 221 V. Ambas a tensões reguladas apresentam harmônicos de alta freqüência oriundas do chaveamento do conversor, com THD de tensão próximo de 6,4%. As tensões na entrada apresentam baixa distorção, sendo o THD de 2,84% para $V_{ab_in}$ e 3,82% para $V_{bc_in}$.

**c. Ocorrência de Sobre–tensão de 7%:**

Com o auxilio de um Variac foi aplicada uma sobre tensão no sistema em torno de 7%. As tensões na entrada assumiram valores superiores a 230 V, como mostradas na Figura 63 a seguir.

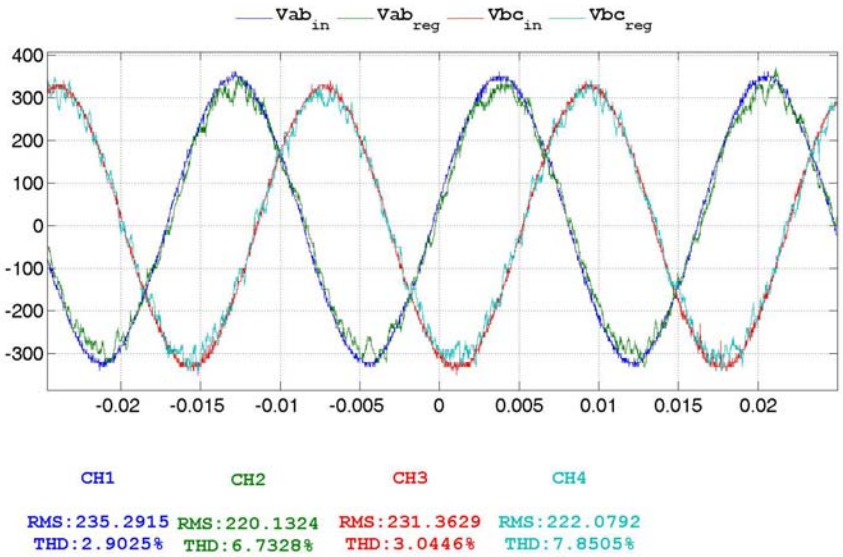



Figura 63 – Tensões de linha na entrada e na barra regulada com a compensação do RDT em situação de sobre–tensão.

As tensões na barra de entrada foram elevadas para 235 V em $V_{ab_in}$ e 231 V a tensão $V_{bc_in}$. Com a compensação realizada pelo RDT, as tensões reguladas apresentaram amplitudes de 220 V em $V_{ab_reg}$ e 222 V em $V_{bc_reg}$. As tensões compensadas apresentam distorções harmônicas na ordem de 6,7% e 7,8%, respectivamente, como resultado da presença de harmônicos de alta freqüência e possível ressonância desses com o sistema. Para realizar a compensação de sobre tensão o RDT injeta uma tensão em contra fase, visando atenuar a tensão de entrada. Para isso, como conseqüência, há um fluxo de potência ativa para o conversor, elevando a tensão do elo CC. Em regime a tensão nominal do elo atingiu 370 V, estabilizando. A tendência do valor da tensão seria crescer indefinidamente. Contudo após a amplitude de 370 V, a energia absorvida pelo elo CC era dissipada pelas perdas de chaveamento, mantendo a tensão no capacitor constante.

**d. Afundamento a 0,6 p.u. na tensão de entrada:**

Para verificar a máxima compensação a ser realizada pelo protótipo do RDT, foi reduzida a tensão de entrada até o ponto máximo de operação. Quando a tensão de entrada atingiu 0,6 p.u. de amplitude o RDT perde a controlabilidade e não mais corrige a tensão de carga.

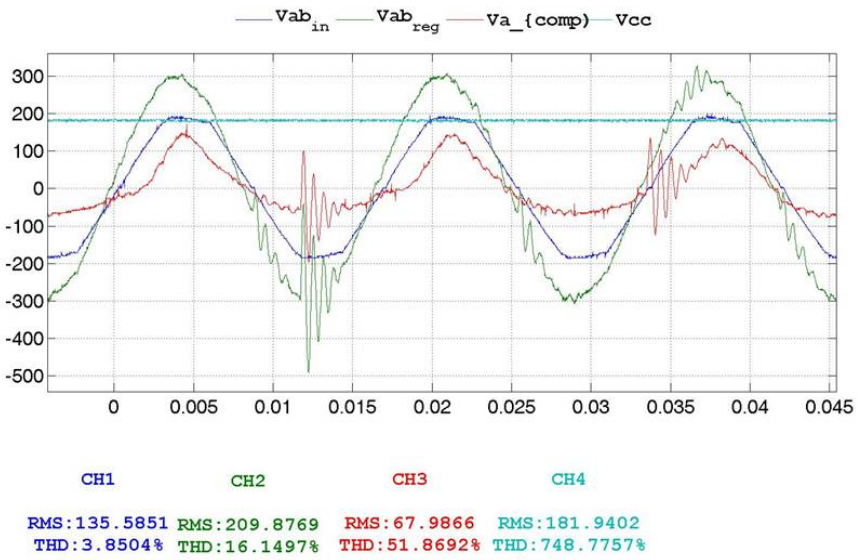



Figura 64 – Tensões de linha na entrada e na carga, a tensão de compensação na fase ‘a’ e tensão no elo CC durante um afundamento a 0,6 p.u..

Pode ser notado na Figura 64 que o RDT começa a se desestabilizar, entrando em colapso de compensação em seguida. Verifica-se que a tensão no elo CC atinge 181 V de amplitude enquanto o conversor injeta uma tensão de compensação de 67 V RMS. Logo, o RDT estudo está limitado a uma compensação máxima de 40% da tensão de entrada.

### 6.1.2 O RDTI

**e. Ocorrência de VTCD de 20%:**

Será avaliada a resposta do RDTI sob um VTCD em torno de 20%. A figura abaixo ilustra o comportamento das tensões de entrada e regulada após o evento.

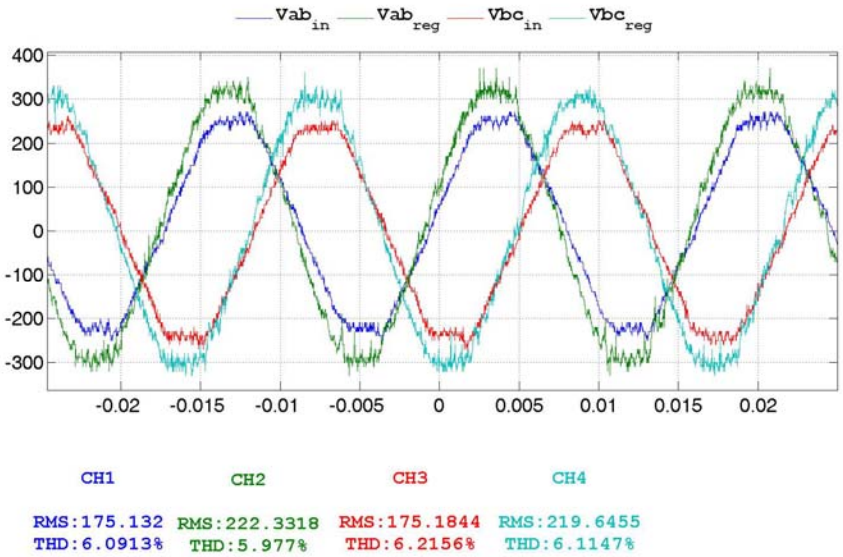



Figura 65 – Formas de onda na barra de entrada e regulada após a ocorrência de um VTCD e a compensação do RDTI.

Na Figura 65 estão ilustradas as formas de onda da barra de entrada e regulada sob um afundamento provocado na entrada do sistema. As tensões de entrada $V_{ab_in}/V_{bc_in}$ apresentam afundamentos com relação ao seu valor nominal, a aproximadamente 175 V ou 0.79p.u.. Com a compensação do RDTI, a tensão regulada $V_{ab_reg}/V_{bc_reg}$ assume 222 V e 219 V de amplitude RMS, respectivamente. Isso representa uma compensação em torno de 44 V. A presença de harmônicos de baixa freqüência proveniente da corrente drenada pela ponte a diodos passante pelo reator de linha distorce a tensão de entrada, na qual apresenta um THD de 6,1%. As tensões reguladas apresentam uma forma de onda senoidal que contém harmônicos de alta freqüência oriundos do chaveamento do conversor, porém com amplitudes muito próximas da nominal. Dessa forma, além da compensação do VTCD, observou-se a compensação de harmônicos realizada pelo equipamento. Mesmo assim, o THD das tensões reguladas foi de 5,9% e 6,1%, respectivamente.

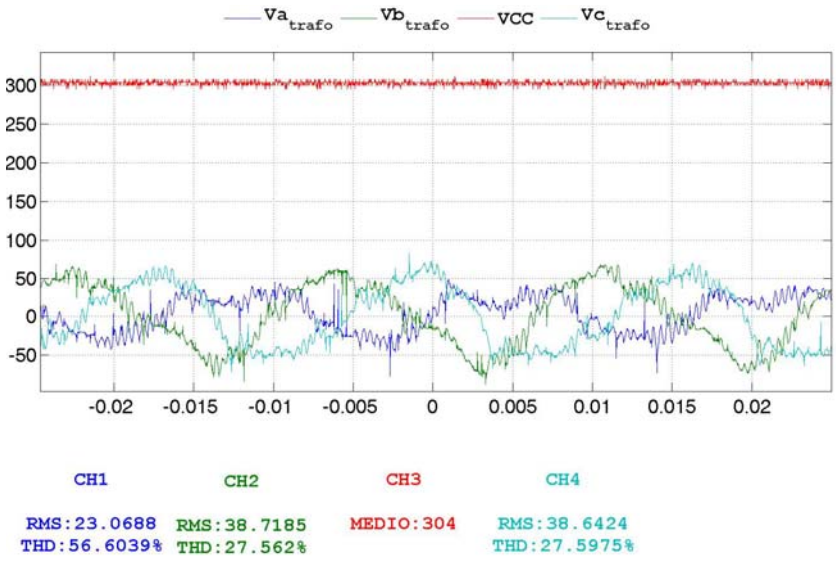



Figura 66 – Tensões de compensação aplicadas no transformador série do RDTI.

As tensões de compensação aplicadas aos transformadores série são apresentadas na Figura 66. A tensão do elo CC durante a compensação também foi monitorada. Pode ser notado que as tensões monofásicas aplicadas apresentam uma forma de onda muito distorcida, com THD acima de 27% para a fase 'b' e 'c' e de 56% para a fase 'a'. Com a presença de harmônicos de baixa freqüência para a compensação da tensão distorcida na entrada e harmônicos de alta freqüência oriundos do chaveamento, o THD das tensões apresenta valores muito altos. Tais tensões têm amplitudes máximas superior a 50 V. Percebe-se que o RDT apresentou valores inferiores na tensão de compensação com relação ao RDTI. Como já mencionado, tal fato é explicado devido à queda de tensão no transformador série do RDTI oriunda da corrente da ponte a diodo, pois esta se localiza após o transformador. Como o retificador do RDTI está conectado na barra regulada, a amplitude média da tensão retificada permanece sem muita variação, em torno de 304 V durante a ocorrência da falta. A tensão nominal retificada é de 311 V quando aplicada uma tensão de fase máxima de 179,6 V de pico (127 V RMS) sobre a ponte.

### f. Ocorrência de Desbalanços de Tensão de 7%:

Com a introdução de transformadores série após a alimentação do sistema, foi provocado um desbalanço na tensão na ordem de 7%. Com isso, a tensão $V_{ab_in}$ chegou a 235 V, enquanto a $V_{bc_in}$ registrou 200 V de amplitude RMS. A figura abaixo ilustra o comportamento das tensões durante a ocorrência da falta.

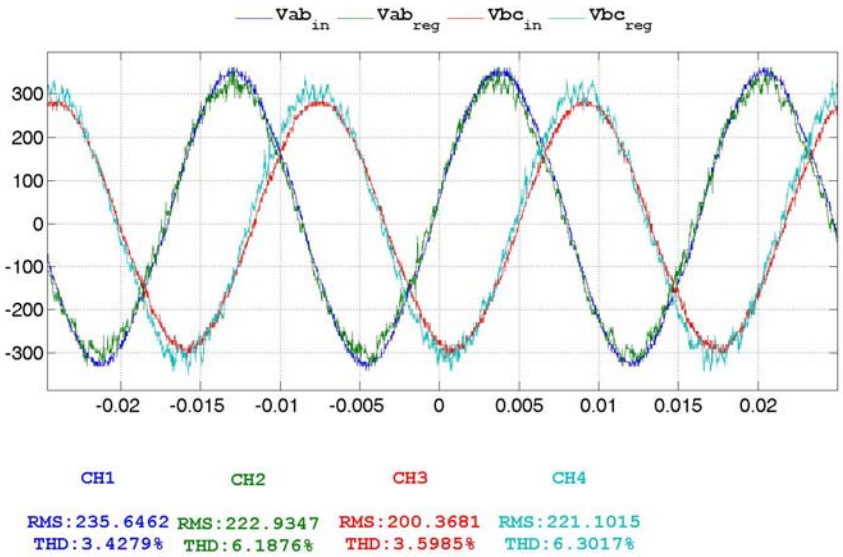



Figura 67 – Tensões de linha na entrada e na barra regulada em situação de desbalanço.

A Figura 67 apresenta as tensões de linha presentes no sistema sob desbalanço de tensão e compensação pelo RDTI. Percebe-se que as tensões de entrada $V_{ab_in}$ e $V_{bc_in}$ estão desbalanceadas, com os seus valores nominais diferentes da nominal 220 V. Contudo, a compensação do RDTI nas tensões da barra regulada $V_{ab_reg}$ e $V_{bc_reg}$ mantém suas amplitudes em 222 V e 221 V, respectivamente. Ambas a tensões reguladas apresentam harmônicos de alta freqüência oriundas do chaveamento do conversor, com THD de tensão em torno de 6,2% e 6,3%, respectivamente. As tensões na entrada apresentam distorção de 3,4% para $V_{ab_in}$ e 3,6% para $V_{bc_in}$.

### g. Ocorrência de Sobre–tensão de 7%:

Com o auxilio de um Variac foi aplicada uma sobre–tensão no sistema em torno de 7%. O distúrbio elétrico provocado elevou as tensões na entrada cuja amplitude de $V_{ab_in}$ passou para 236 V e $V_{bc_in}$ a 233 V. A Figura 68 mostra as formas de onda na entrada e na barra regulada.

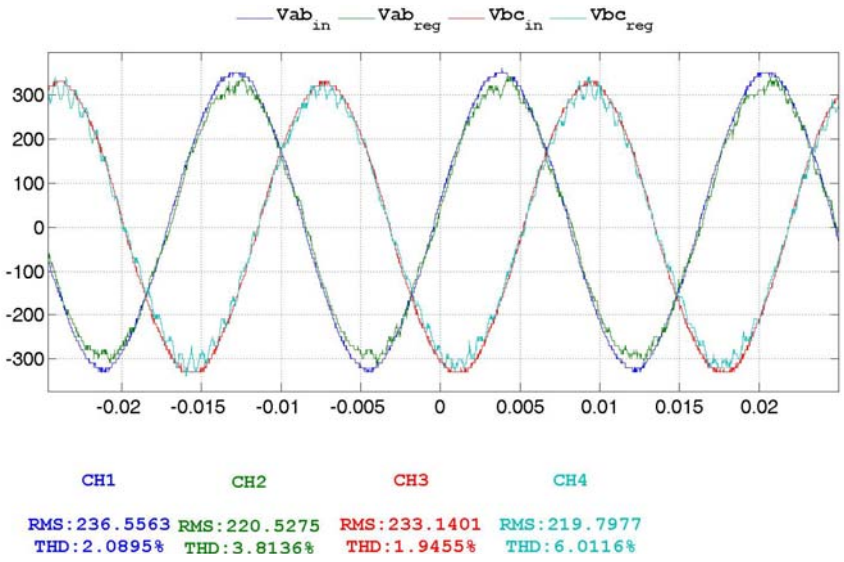



Figura 68 – Tensões de linha na entrada e na barra regulada com a compensação do RDTI em situação de sobre–tensão.

Com a compensação realizada pelo RDTI, as tensões reguladas apresentaram amplitudes de 220 V em $V_{ab_reg}$ e 219 V em $V_{bc_reg}$ mesmo na presença de sobre–tensão na entrada. As tensões compensadas apresentam distorções harmônicas na ordem de 3,8% e 6,0%, respectivamente, como resultado da presença de harmônicos de alta freqüência e possível ressonância desses com o sistema. Como na compensação de sobre–tensão pelo RDT, neste caso também há um aumento da tensão do elo CC devido ao fluxo de energia para o conversor. A tensão permaneceu em 384 V durante o evento.

**h. Afundamento a 0,6 p.u. na tensão de entrada:**

Esta falta foi simulada para comparar a resposta do RDTI com a do RDT. Observou-se anteriormente que o protótipo do RDT não conseguiu compensar a tensão de carga na presença de um afundamento a 0,6p.u..

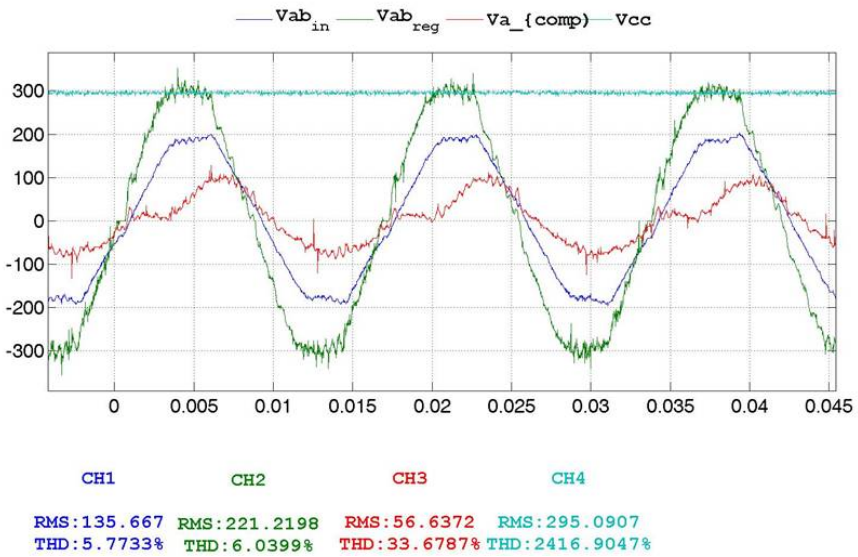



Figura 69 – Tensões de linha na entrada e na barra regulada, tensão de compensação na fase ‘a’ e tensão no capacitor CC em situação de afundamento.

Contudo, de acordo com a Figura 69, pode ser notado que o RDTI compensa a ocorrência de um VTCD de 40%, mantendo a tensão de carga regulada em 1p.u.. Cabe salientar que devido a presença de alto conteúdo harmônico na tensão de entrada, a tensão de compensação também se encontra bastante distorcida. Contudo a tensão $V_{CC}$ mantém próxima de 300V, como era esperado, enquanto a tensão de compensação na fase ‘a’ é de 56 V RMS.

## 6.2 Conclusões Parciais

A partir dos resultados operacionais obtidos verificou-se a eficácia do algoritmo de controle proposto. Ambas as topologias corresponderam aos resultados teóricos obtidos na simulação, demonstrando ser equipamentos confiáveis na compensação de distúrbios de tensão presentes no sistema elétrico.

Observou-se que em ambas as topologias e condições de falta as tensões reguladas apresentaram distorções harmônicas na ordem de 6%. Tal fato é fruto de harmônicos de alta freqüência que não foram totalmente eliminados pelo filtro passa–baixas ‘LC’, e/ou possível ressonância do equipamento com o sistema. Pode também ser notada a tensão do elo CC do RDTI que permaneceu próxima da nominal (304 V) durante o evento de VTCD, enquanto a tensão do RDT teve uma amplitude de 244 V.

O RDTI compensa VTCD na ordem de 40% enquanto o RDT se desestabiliza e perde controlabilidade.

# CAPÍTULO 7

## CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

As cargas sensíveis ou críticas estão sujeitas a um funcionamento deficiente na ocorrência de distúrbios na tensão de alimentação das mesmas e isto gera perdas financeiras para as empresas. A grande maioria dos distúrbios na tensão são os afundamentos momentâneos de tensão. Estes são gerados principalmente por faltas no sistema, que podem estar localizadas a quilômetros de distância da carga afetada.

Existem várias maneiras e equipamentos para proteger estas cargas contra distúrbios na tensão. Este documento teve seu foco voltado para os compensadores série de tensão dinamicamente controlados, genericamente denominado de RDT. Este equipamento tem a funcionalidade de regular a tensão de carga, fornecendo uma tensão senoidal limpa, livre de harmônicos e desbalanços de tensão. Este equipamento apresenta uma resposta muito rápida, grande confiabilidade e robustez.

A partir dos resultados de simulação obtidos com as três topologias em estudo, verificou-se que todas atingiram o seu objetivo, protegendo a carga frente a diversos distúrbios elétricos presentes no sistema de distribuição. O algoritmo de controle proposto mostrou ser robusto e rápido, destacando-se a sua simplicidade e o baixo esforço computacional para a sua implementação em micro controladores.

O RDTI apresentou a vantagem de possuir um elemento armazenador de energia de proporções muito reduzidas com relação à topologia do RDT. Também pode ser analisado o fluxo de potência nos equipamentos, que demonstrou que o RDTI para realizar uma dada compensação tem sua potência maior que o RDT.

Particularmente, foram apreciadas vantagens e desvantagens das topologias em estudo, contribuindo para diversificar possíveis soluções para proteção de cargas sensíveis. O RDTI apresentou a vantagem de manter a tensão do elo CC sob uma amplitude próxima da nominal em casos de ocorrência de faltas. Contudo, foi observado que para compensar a tensão de entrada, a corrente passante pelo transformador do RDTI tem uma amplitude superior ao do RDT, implicando em um transformador de maior potência.

O RDTSS também apresentou resultados satisfatórios em simulação, operando contra VTCD's na ordem de 10%. A importância dada a esta topologia modelada está na ausência de uma fonte externa de energia ativa, simplificando e barateando o circuito de potência. Contudo, foi observado que para compensar a ocorrência de um afundamento a 0,9 p.u. foi necessária uma tensão de compensação de 0,6 p.u., ou seja, um RDTSS de 0,6 p.u. para compensar apenas 10% de afundamento.

Com relação aos resultados operacionais dos protótipos desenvolvidos em bancada, RDTI e RDT, as tensões presentes na barra regulada apresentaram distorções harmônicas na ordem de 6% em média. Concluiu-se que este fato é conseqüência da não totalidade na filtragem das altas freqüência geradas pelo chaveamento e possível ressonância dos equipamentos com o sistema elétrico implantado em laboratório. Ambas as topologias mantiveram as tensões de carga reguladas na presença de distúrbios elétricos na tensão de entrada. Entretanto, na presença de um afundamento na ordem de 0,6 p.u. o RDT se desestabiliza e não consegue manter a tensão de carga estabilizada. O RDTI apresentou maior robustez, mantendo a tensão de carga regulada mesmo em condições extremas conforme ilustrado nos resultados práticos obtidos.

Os resultados experimentais obtidos com as topologias do RDT e do RDTI implementadas em bancada laboratorial no Laboratório de Eletrônica de Potência COPPE/UFRJ – ELEPOT alcançaram os objetivos. Foi comprovada a sua eficiência na proteção de uma carga sensível contra afundamentos de tensão, distúrbios harmônicos e desequilíbrio de tensão e sobre–tensão. Os resultados apresentados pelos protótipos validam a estratégia de controle proposta e implementada. A aplicação das topologias aqui estudadas dependerá do tipo de carga e distúrbios elétricos que o equipamento irá operar.

Como sugestões para trabalhos futuros são indicados os seguintes itens:

- Análise detalhada da operação de um Restaurador Dinâmico de Tensão a partir de uma função de transferência específica, avaliando possíveis adaptações do circuito de potência e algoritmo de controle;
- Otimização do algoritmo de controle digital e circuito de potência visando uma compensação que entregue a carga uma tensão mais limpa, livre de harmônicos de alta freqüência;
- Desenvolver um protótipo em escala industrial de um Restaurador Dinâmico de Tensão;
- Avaliar novos estudos topológicos de compensadores de tensão.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


[1] Hingorani, N. G., “Introducing Custom Power”, IEEE Spectrum, v. 32, n. 6, pp. 41-48, June 1995.

[2] Bollen, M.H.J., Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, IEEE Press, 2000

[3] Dorr, D. S., “Power quality study-1990 to 1995-initial results”, Proceedings of the Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1992, pp.303-308.

[4] Júlio Shigeaki Omori, Francis de Alencar Prado, “Afundamentos de Tensão no Consumidor AAM do Brasil Estudo de um Caso de Sucesso”, VI SBQEE, Belém, Brasil, Agosto 2005.

[5] Douglas, J., “Power Quality Solutions”, *IEEE Power Engineering Review,* v. 14, n. 3, pp. 3-7, March 1994.

[6] Dawei Gao; Qingchun Lu; Jishou Luo, “A new scheme for on-load tap-changer of transformers”, Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on Volume 2, 13-17 Oct. 2002 Page(s):1016 - 1020 vol.2.

[7] Choi, S.S.; Liu, J.W.; Chen, S.; “An analysis and implementation of step-dynamic voltage regulator”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, Volume 2, 27-31 Jan. 2002 Page(s):713 - 718 vol.2

[8] Andrei, R.G.; Kaushik, R.R.; Reinaker, R.W.; “Bridge capacitor bank design and operation” Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume 11, Issue 1, Jan. 1996 Page(s):227 – 233.

[9] Sadanandan, N.D.; Deviney, F.A.; Hollomon, L.; Sendaula, M.; “Microprocessor-based capacitor bank control and protection system”, Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 4, Issue 1, Jan. 1989 Page(s):241 – 247

[10] Skok, S.; Skok, M.; Vrkic, N.; “Electrical performance test procedure for uninterruptible power supplies”, Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT '04. 2004 IEEE International Conference on Volume 2, 8-10 Dec. 2004 Page(s):667 - 671 Vol. 2.

[11] Fernandez, H.; Martinez, A.; Guzman, V.; Gimenez, M.; “An experimental and training platform for uninterrupted power in isolated locations: wind turbine - electric generator - battery bank (TP-WT-UPS), ”Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on 11-14 Sept. 2005 Page(s):8 pp.

[12] Schneider,F.; “Reliability of uninterruptible power supply systems”, Telecommunications Energy Conference, 1989. INTELEC '89. Conference Proceedings.,

Eleventh International 15-18 Oct. 1989 Page(s):14.4/1 - 14.4/7 vol.2.

[13] Cavaliere, C.A.C.; “Análise do STATCOM operando em sistemas desbalanceados”, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2001.

[14] Cavaliere, C.A.C.; et alia; “Aplicação do STATCOM na Distribuição: Regulação de Tensão e Controle de Fator de Potência”, V SBQEE (Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica), Outubro 2003.

[15]

[16] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. “Resolução nº 505”. Regulamentada em 26 de novembro de 2001. Disponível em: http://www.aneel.gov.br.

[17] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. “Padrões de Desempenho da Rede Básica – Submódulo 2.2”, versão aprovada pelo conselho administrativo em outubro de 2000. Disponível em: http://www.ons.org.br.

[18] Ribeiro, T. N.; Mertens, E.; Brasil, D. O. C.; Correia, D. M. “Variações de Tensão de Curta Duração – Esforços Conjugados do ONS, ANEEL e Agentes”. Anais do IV Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica – SBQEE, Porto Alegre: PUCRS, 2001. p. 409-414. ISBN: 85-7430-225-2.89, Bibliografia 90.

[19] Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos - IEEE. “IEEE Standard 446: IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications”. New York: 1987. ISBN: 1-55937-969-3.

[20] Koval, D. O. “Computer Performance Degradation due to their susceptibility to power supply disturbances”. Industry Applications Society Annual Meeting, p. 1754-1760, 1989.

[21] ITI (CBEMA) curve Application Note. “Technical Committee 3 (TC3) of the Information Technology Industry Council”. Disponível em: http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf.

[22] IEEE Std 1346-1998, “IEEE recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment”, 1998.

[23] IEEE Std 1159-1995, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”, 1995.

[24] V IEEE Std 493-1997 [IEEE Gold Book], “IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems”, 1998

[25] IEEE Std 1159-1995, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”, 1995.

[26] Gomez, J.C.; Marcos, M.M., “Effect of Distribution System Protection on Voltage Sags”, *IEEE Power Engineering Review*, v. 20, n. 5, pp. 66–68, May 2000.

[27] Nelson, R. J., Legro, J. R., Gurlaskie, G. T., Woodley, N. H., Sarkozi, M., And Sundaram, A., “Voltage sag relief: Guidelines to estimate DVR equipment ratings”, Proceedings of American Power Conference, April 1996.

[28] Sasso, E. M.; Sotelo, G. G.; Ferreira, A. A.; Watanabe, E. H.; Aredes M.; Barbosa, P. G.; “Investigação dos Modelos de Circuitos de Sincronismo Trifásicos Baseados na Teoria das Potências Real e Imaginária Instantâneas (p-PLL e q-PLL)”; CBA 2002, 2002, Natal (RN). Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática.

[29] D. C. Junior., L. Rolim, and M. Aredes, “Analysis and software implementation of a robust synchronizing circuit PLL circuit,” ISIE 2003 - International Symposium on Industrial Electronics, vol. 1, pp. 292–297, 2003.

[30] O. G. S. Castellões, M. Aredes, “A Series Compensator for Voltage Sags”, Proceedings of the 6th Brazilian Power Electronics Conference, pp.372-377, November 2001.

[31] Agelidis, V.G.; Goh, H.C.; “Low-distortion variable-level PWM technique” Electric Power Applications, IEE Proceedings, Volume 145, Issue 2, March 1998 Page(s):73 – 78.

[32] Yu, Z.; Mohammed, A.; Panahi, I., “A review of three PWM techniques” American Control Conference, Proceedings of the 1997 Volume 1, 4-6 June 1997 Page(s):257 - 261 vol.1.

[33] J. Holtz, “Pulsewidth modulation for electronic power conversion,” Proceedings of the IEEE, vol. 82, pp. 1194 – 1214, August 1994.

[34] Profumo, F.; Boglietti, A.; Griva, G.; Pastorelli, M.; “Space vector and sinusoidal PWM techniques comparison keeping in account the secondary effects” AFRICON '92 Proceedings., 3rd AFRICON Conference 22-24 Sept. 1992 Page(s) 394 – 399.

[35] V. Blasko, R. Autom, A. Co, and W. Mequon, “A hybrid PWM strategy combining modified space vector and triangle comparison methods,” Power Electronics Specialists Conference, 1996. PESC’96 Record., 27th Annual IEEE, vol. 2, 1996.

[36] Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P., “Power Electronics: Converters, Applications, and Design”, 2 ed., New York, John Wiley & Sons, 1995.

[37] Holtz, J., “Pulse Width Modulation for Electronic Power Conversion”, In: BOSE, B., K. (ed), Power Electronics and Variable Frequency Drivers, 1ed., chapter 4, New York, IEEE Press, 1997.

[38] JL Silva Neto, I R Filho, RM Fernandes, JC Ferreira, DR Costa, LG Rolim, M Aredes, “Implementation of Two Topologies of a Low Cost Series Compensator for Voltage Sags”, PESC, Recife, 2005

[39] M. Aredes, “Active Power Line Conditioners”, Ph.D. Thesis, Technishe Univesität Berlin, Berlin, 1996.

[40] I R Filho, JL Silva Neto, LG Rolim, M Aredes, “Design and Implementation of a Low Cost Series Compensator for Voltage Sags”, IEEE ISIE 2006, pg. 1353–1357, July 2006, Montréal, Québec, Canada.

[41] Costa Jr., D. R., Moor Neto, J. A., AREDES, M., “Análise de uma estratégia de controle para Restauradores Dinâmicos de Tensão”, In: Anais do Congresso Brasileiro de Automática, pp. Gramado, Setembro 2004.