

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONTROLE HIERÁRQUICO E ADAPTATIVO PARA AUMENTO DO
DESEMPENHO OPERACIONAL DE REGULADORES DE TENSÃO EM
REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES**

TESE DE DOUTORADO

Paulo Ricardo da Silva Pereira

**Santa Maria, RS, Brasil.
2014**

**CONTROLE HIERÁRQUICO E ADAPTATIVO PARA
AUMENTO DO DESEMPENHO OPERACIONAL DE
REGULADORES DE TENSÃO EM REDES ELÉTRICAS
INTELIGENTES**

Paulo Ricardo da Silva Pereira

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica.**

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Luciane Neves Canha

**Santa Maria, RS, Brasil.
2014**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Pereira, Paulo Ricardo da Silva
Controle Hierárquico e Adaptativo para Aumento do
Desempenho Operacional de Reguladores de Tensão em Redes
Elétricas Inteligentes / Paulo Ricardo da Silva Pereira.-
2014.

139 p.; 30cm

Orientadora: Luciane Neves Canha
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2014

1. Automação 2. Controle de Tensão 3. Qualidade da
Energia Elétrica 4. Redes Elétricas Inteligentes 5.
Reguladores de Tensão I. Canha, Luciane Neves II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Tese de Doutorado

**CONTROLE HIERÁRQUICO E ADAPTATIVO PARA AUMENTO DO
DESEMPENHO OPERACIONAL DE REGULADORES DE TENSÃO EM
REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES**

elaborada por
Paulo Ricardo da Silva Pereira

como requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA

Luciane Neves Canha, Dra.
(Presidente / Orientador)

Alexandre Cunha Oliveira, Dr. (UFCG)

Benemar Alencar de Souza, Dr. (UFCG)

Alzenira da Rosa Abaide, Dra. (UFSM)

Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 28 de março de 2014.

Dedico este trabalho aos meus avós Antonio, Clélia, Arlindo e Ana, pelo exemplo que sempre foram para mim durante minha vida, aos meus pais Daltro e Vera e meu irmão Rafael.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a professora Luciane Neves Canha, que tanto colaborou para o sucesso deste trabalho, incentivando, focando e apoiando as iniciativas.

À Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica e, em especial, aos colegas da Divisão de Planejamento e Engenharia, pelas condições proporcionadas para a realização do curso.

Aos grandes amigos Claudia Gabriela da Silva Oliveira, Enoque Dutra Garcia e Isadora Cardozo Dias, sempre presentes em todos os momentos de alegria e desespero, pela amizade, pelo mate, pela parceria e pelas inúmeras contribuições durante o desenvolvimento deste trabalho. Serei eternamente grato.

Enfim, agradeço aos meus amigos e familiares que, embora não nomeados, direta ou indiretamente estiveram envolvidos com a realização deste trabalho incentivando-me a prosseguir fazendo sempre o melhor possível.

RESUMO

Tese de Doutorado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Maria

CONTROLE HIERÁRQUICO E ADAPTATIVO PARA AUMENTO DO DESEMPENHO OPERACIONAL DE REGULADORES DE TENSÃO EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

AUTOR: PAULO RICARDO DA SILVA PEREIRA

ORIENTADORA: LUCIANE NEVES CANHA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 28 de Março de 2014.

A evolução dos equipamentos, novas funções e algoritmos de controle, além de sistemas supervisórios, automação e redes elétricas inteligentes oferecem às distribuidoras inúmeras condições para a melhoria do perfil de tensão em suas redes bem como o uso mais racional dos seus equipamentos. Para os reguladores de tensão, a presença de equipamentos em série, os diferentes cenários de carregamento e topologias que podem surgir devido à realização de manobras tornam necessária uma constante avaliação de seus ajustes e condições operativas. A dinâmica de operação e influência mútua entre os reguladores traz efeitos em toda a rede de distribuição. A falta de coordenação entre os equipamentos pode resultar em transgressões dos níveis de tensão, reclamações dos consumidores e aumento no número de comutações dos reguladores. Este trabalho apresenta de um controle híbrido, operando com módulos individuais e controle em nível local, mas integrados a um controle hierárquico e centralizado que atua de acordo com a topologia e condição operativa da rede. O controle individual (CI), desenvolvido a partir de uma metodologia com funções de auto ajuste e processamento dos dados de carregamento e tensão nos próprios controladores, permite o processamento distribuído do controle de tensão, com envio de informações ao controle centralizado através de respostas não solicitadas via sistema SCADA quando necessário. O controle global opera integrado ao sistema SCADA e executa funções de coordenação, validação e hierarquização, em tempo real, racionalizando as comutações dos equipamentos, atuando na temporização e assumindo suas funções de controle. O controle hierárquico adaptativo de tensão (CHAT), desenvolvido nesta tese, foi avaliado e comparado com a operação convencional em diversos cenários operativos e apresentou uma resposta mais rápida e eficaz na regularização de tensão tanto em regime normal de operação como em condições de reconfiguração da rede ou contingência atuando de maneira proativa no controle de tensão das redes de distribuição.

Palavras-chave: Automação, Controle de Tensão, Qualidade da Energia Elétrica, Redes Elétricas Inteligentes, Reguladores de Tensão.

ABSTRACT

PhD Thesis

Post-Graduation Program in Electric Engineering

Federal University of Santa Maria

HIERARCHICAL AND ADAPTIVE CONTROL FOR INCREASE IN OPERATIONAL PERFORMANCE OF STEP VOLTAGE REGULATOR IN SMART GRIDS

AUTHOR: PAULO RICARDO DA SILVA PEREIRA

SUPERVISOR: LUCIANE NEVES CANHA

Date and Defense Place: March 28 of 2014, Santa Maria.

The evolution of equipment, new functions and control algorithms, supervisory systems, automation and smart grids offer to utilities numerous conditions for improving the voltage profile and the rational use of its equipment on their networks. To the step voltage regulators, the presence of serial equipment, different loading scenarios and topologies that can arise due to perform maneuvers necessitate a constant review of its settings and operating conditions. The dynamics of operation and mutual influence between regulators brings effects throughout the distribution network. The deficiency of coordination between the equipment can result in violations of voltage levels, consumer complaints and increase in switching regulators. This work presents a hybrid control, operating with individual modules and control at the local level, but integrated into a hierarchical and centralized control that acts according to the topology of the network and operational condition. The individual control (IC), developed from a methodology self-tuning functions and data processing load and strain on the controllers themselves, enables distributed processing of voltage control, sending information to the centralized control through no responses requested via SCADA system when needed. The global control integrated into the SCADA system operates and performs functions of coordination, validation and prioritization, in real time, streamlining the switching equipment, working on timing and assuming their control functions. The adaptive hierarchical voltage control (CHAT), developed in this thesis, was evaluated and compared with conventional operation in various operating scenarios and showed a fast and effective response both regularization voltage under normal operating conditions as in the reconfiguration of network or contingency acting proactively in voltage control of distribution networks.

Keywords: Automation, Voltage Control, Power Quality, Smart Grids, Step Voltage Regulators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Controle de Tensão nos Sistemas de Distribuição	24
Figura 2.1 – Automação e Comunicação em uma Rede Inteligente	32
Figura 3.1 – Sistema elétrico em sua configuração original.....	41
Figura 3.2 – Sistema reconfigurado, alterações das condições operativas da rede e reguladores	42
Figura 3.3 – Modos de temporização dos reguladores de tensão	44
Figura 3.4 – Composição dos diferentes modos de operação dos reguladores de tensão	45
Figura 4.1 - Visão geral do CHAT	48
Figura 4.2 - Controle Individual – Visão Geral.....	49
Figura 4.3 - Controle Hierárquico – Visão Geral	50
Figura 4.4 – Zonas de regulação de tensão.....	52
Figura 4.5 – Fluxograma do Controle Hierárquico e Adaptativo de Tensão	53
Figura 4.6 -Fluxograma de Ajuste do Controle Individual	55
Figura 4.7 – Efeito do LDC como redutor da tensão de saída.....	56
Figura 4.8 – Efeito do LDC como ajuste variável da tensão de referência	57
Figura 4.9 - Definição da Faixa de Insensibilidade – Controlador <i>Fuzzy</i>	58
Figura 4.10 – Variáveis de Entrada do Controlador.....	58
Figura 4.11 – Funções de Pertinência – Insensibilidade	60
Figura 4.12 – Rede de distribuição com dispositivos CI distribuídos e zonas de regulação....	62
Figura 4.13 - Posição de TAP e Tensão de Saída de um regulador de tensão	63
Figura 4.14 - Limitação da posição de TAP máximo do regulador	63
Figura 4.15 - Antecipação da Operação do Regulador.....	64
Figura 4.16 - Efeitos das ações de controle na redução das comutações e transgressão tensão	65
Figura 4.17 - Rede com reguladores – configuração original	67
Figura 4.18 - Rede com reguladores – reconfigurada	69
Figura 4.19 – Fluxograma do controlador em tempo real	76
Figura 4.20 – Diagrama do controlador <i>Fuzzy</i> e suas respectivas entradas	77
Figura 4.21 – Funções de Pertinência para as Entradas de do Controlador <i>Fuzzy</i>	77
Figura 4.22 – Funções de Pertinência para as Entradas de do Controlador <i>Fuzzy</i>	78
Figura 4.23 – Funções de Pertinência para as Entradas de do Controlador <i>Fuzzy</i>	78
Figura 4.24 – Saída do Controlador <i>Fuzzy</i>	79
Figura 4.25 – Integração das metodologias desenvolvidas com o sistema SCADA.....	81
Figura 4.26 – Sistema de Distribuição e Aplicação do CHAT.....	82
Figura 5.1 - Sistema teste IEEE 34 barras original.....	85
Figura 5.2 - Sistema teste – configuração original	86
Figura 5.3 – Curva de carga do alimentador – sistema teste na configuração original	87
Figura 5.4 - Sistema Teste na Configuração Após a Manobra.....	88
Figura 5.5 – Curva de carga do regulador R6 – carga a ser transferida do AL2 para o AL1 ...	89
Figura 5.6 - Comutações de TAP em Operação Normal – Cenário 1	91
Figura 5.7 - Tensão de Saída em Operação Normal – Cenário 1	91
Figura 5.8 - Comutações de TAP com Controle Centralizado – Cenário 1	92
Figura 5.9 - Tensão de Saída com Controle Centralizado – Cenário 1	93
Figura 5.10 - Tensão de saída e índice de severidade – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 1.....	94
Figura 5.11 - Comutações de TAP em Operação Normal – Cenário 2	95
Figura 5.12 - Tensão de Saída em Operação Normal – Cenário 2	95

Figura 5.13 - Comutações de TAP com aplicação do CHAT – Cenário 2.....	96
Figura 5.14 - Tensão de Saída com aplicação do CHAT – Cenário 2.....	96
Figura 5.15 - Tensão de saída e índice de severidade – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 2.....	97
Figura 5.16 - Comutações de TAP em Operação Normal – Cenário 3.....	98
Figura 5.17 - Tensão de Saída em Operação Normal – Cenário 3.....	99
Figura 5.18 - Comutações de TAP com aplicação do CHAT – Cenário 3.....	100
Figura 5.19 - Tensão de Saída com aplicação do CHAT – Cenário 3.....	100
Figura 5.20 - Tensão de saída e índice de severidade – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 3.....	101
Figura 5.21 - Comutações de TAP em Operação Normal – Cenário 3 – 15 h – 16 h.....	102
Figura 5.22 - Tensão de Saída em Operação Normal – Cenário 3.....	102
Figura 5.23 - Comutações de TAP com aplicação do CHAT – Cenário 3.....	103
Figura 5.24 - Tensão de Saída com aplicação do CHAT – Cenário 3.....	103
Figura 5.25 - Tensão de saída e índice de severidade – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 3.....	104
Figura 5.26 – Tensão de saída e índice de severidade – transição entre o patamar das 19 h e 20 h – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 4.....	105
Figura 5.27 – Tensão de saída e índice de severidade – transição entre o patamar das 15 h e 16 h – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 4.....	106
Figura 5.28 - Comutações de TAP em Operação Normal – Cenário 6.....	108
Figura 5.29 - Tensão de Saída em Operação Normal – Cenário 6.....	108
Figura 5.30 - Comutações de TAP com aplicação do CHAT – Cenário 6.....	109
Figura 5.31 - Tensão de Saída com aplicação do CHAT – Cenário 6.....	109
Figura 5.32 - Tensão de saída e índice de severidade – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 6.....	110
Figura 5.33 - Comutações de TAP em Operação Normal – Cenário 7.....	111
Figura 5.34 - Tensão de Saída em Operação Normal – Cenário 7.....	111
Figura 5.35 - Comutações de TAP com aplicação do CHAT – Cenário 7.....	112
Figura 5.36 - Tensão de Saída com aplicação do CHAT – Cenário 7.....	112
Figura 5.37 - Tensão de saída e índice de severidade – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 7.....	113
Figura 6.1 – Número de comutações em operação convencional.....	115
Figura 6.2 – ISTT em operação convencional.....	116
Figura 6.3 – Horário de ponta com aplicação de TI.....	117
Figura 6.4 – Tempo de regularização da tensão em operação convencional.....	117
Figura 6.5 – Número de comutações – Aplicação do CHAT.....	118
Figura 6.6 – ISTT – Aplicação do CHAT.....	119
Figura 6.7 – Tempo de Regularização da Tensão – Aplicação do CHAT.....	119
Figura 6.8 – Número de Comutações – Comparativo método convencional e CHAT.....	120
Figura 6.9 – ISTT – Comparativo método convencional e CHAT.....	120
Figura 6.10 – Tempo de Regularização – Comparativo método convencional e CHAT.....	121
Figura 6.11 – Número de comutações no sistema reconfigurado.....	122
Figura 6.12 – ISTT no sistema reconfigurado.....	122
Figura 6.13 – Tempo de Regularização no sistema reconfigurado.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Condições operativas dos reguladores, alarmes e possíveis ações de controle ...	43
Tabela 4.1 – Funções e parâmetros <i>fuzzy</i> para a variável Variação da Tensão de Entrada.....	59
Tabela 4.2 – Funções e parâmetros <i>fuzzy</i> para a variável Limites de Tensão	59
Tabela 4.3 – Funções e parâmetros <i>fuzzy</i> para a variável Insensibilidade.....	60
Tabela 4.4 – Regras para definição da insensibilidade utilizadas no controlador <i>fuzzy</i>	60
Tabela 4.5 – Funções e parâmetros <i>Fuzzy</i> para a variável Variação de Tensão.....	78
Tabela 4.6 – Funções e parâmetros <i>Fuzzy</i> para a variável Tensão de Saída	79
Tabela 4.7 – Funções e parâmetros <i>Fuzzy</i> para a variável Variação de Carga.....	79
Tabela 4.8 – Funções e parâmetros <i>fuzzy</i> para a variável Ação de Controle.....	80
Tabela 4.9 – Regras para definição da Insensibilidade utilizadas no controlador Fuzzy	80
Tabela 4.10 - Alarmes do Sistema SCADA para ativação do CHAT	83
Tabela 5.1 – Cenários de estudo para a aplicação prática	89
Tabela 5.2 - Ajustes dos reguladores de tensão	90
Tabela 5.3 - Número de Comutações e Severidade das Transgressões.....	93
Tabela 5.4 - Número de Comutações e Severidade das Transgressões.....	94
Tabela 5.5 - Número de Comutações e Severidade das Transgressões.....	106
Tabela 5.6 - Ajustes dos reguladores de tensão	107
Tabela 5.7 - Número de Comutações e Severidade das Transgressões.....	107

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A – Características dos Alimentadores do Sistema Teste.....	134
APÊNDICE B – Cargas Distribuídas dos Alimentadores do Sistema Teste.....	135
APÊNDICE C – Cargas Concentradas dos Alimentadores do Sistema Teste	136
APÊNDICE D – Corrente de Carga dos Reguladores – Cenários 1 a 3, 6 e 7.....	137
APÊNDICE E – Corrente de Carga dos Reguladores – Cenários 4 e 5.....	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADMS: Advanced Distribution Management System

AL: Alimentador

AMI: *Advanced Metering Infrastructure*

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

BC: Banco de Capacitores

BT: Baixa Tensão

CDC: Comutador de Derivações sob Carga

CELG: Companhia Elétrica do Estado de Goiás

CHAT: Controle Hierárquico e Adaptativo de Tensão

CI: Controle Individual

DRP: Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica

DRC: Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária

EFFP: Energia Fornecida Fora de Padrão

GD: Geração Distribuída

GIS: *Geographic Information System*

I: Corrente

ICC: Índice de Consumidores com Tensão Crítica

ISTT: Índice de Severidade das Transgressões de Tensão

Ins: Faixa de Insensibilidade em [%]

LDC: *Line Drop Compensation*

MH: Matriz Hierárquica

MT: Média Tensão

MV: Matriz de Tensão

OLTC: *On Load Tap Changer*

P: Potência ativa

pu: Por unidade

PRODIST: Procedimento de Distribuição do Setor Elétrico Nacional

Q: Potência reativa

REI: Redes Elétricas Inteligentes

RT: Regulador de Tensão

RTC: Relação de Transformação de Corrente

RTP: Relação de Transformação de Potencial

SCADA: *Supervisory Control And Data Acquisition*

SE: Subestação

SED: Sistema Elétrico de Distribuição

SEP: Sistema Elétrico de Potência

TAP: *Transformer Adjustment Position*

$t_{\text{Atuação}}$: tempo até o início da comutação do regulador

TI: temporização inversa

TL: temporização linear

TC: Transformador de Corrente

TP: Transformador de Potencial

TR: Transformador

t_1 : Tempo de retardo aplicado para a primeira comutação no RT

t_2 : Tempo de retardo entre comutações após a primeira comutação do RT

U_R : Variável referente a resistência da linha

U_X : Variável referente a reatância da linha

U_{REF} : Tensão de referência

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	23
1.1	Motivação e Justificativa.....	25
1.2	Objetivos da Tese.....	26
1.3	Contribuições Inovadoras do Trabalho.....	27
1.4	Organização dos Capítulos.....	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1	Controle de Tensão Clássico – Sem Automação.....	29
2.2	Conceito de Redes Elétricas Inteligentes.....	31
2.3	Controle Moderno de Tensão nas Redes de Distribuição.....	33
2.4	Considerações finais.....	37
3	CONTROLE DE TENSÃO E AUTOMAÇÃO.....	39
3.1	Recursos de Automação e os Reguladores de Tensão.....	39
3.2	Considerações finais.....	46
4	METODOLOGIA PARA O CONTROLE HIERÁRQUICO E ADAPTATIVO DE TENSÃO.....	47
4.1	CHAT – Controle Hierárquico e Adaptativo de Tensão.....	47
4.2	Controle Individual – Processamento Distribuído do Controle de Tensão.....	51
4.2.1	Heurística para a definição de U_{REF} , U_R e U_X	54
4.2.2	Cálculo da Faixa de Insensibilidade.....	57
4.3	Influência Entre Zonas de Regulação.....	61
4.4	Controle Hierárquico – Módulo Centralizado.....	66
4.5	Controlador em Tempo Real.....	75
4.6	Aplicação Integrada do CHAT.....	80
4.7	Considerações finais.....	83
5	APLICAÇÃO PRÁTICA.....	85
5.1	Descrição do Sistema Teste.....	85
5.2	Cenário 1 – Sistema em Operação Normal.....	90
5.3	Cenário 2 – Operação não sequencial na Subestação – RT1.....	95
5.4	Cenário 3 – Temporização Inversa nos reguladores R2 e R3.....	97
5.5	Cenário 4 – Sistema Reconfigurado.....	104
5.6	Cenário 5 – Sistema Reconfigurado e Novos Ajustes.....	107
5.7	Cenário 6 – Sistema com RT2 sem CHAT.....	108
5.8	Cenário 7 – Sistema com RT3 sem CHAT.....	110
5.9	Considerações finais.....	113
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	115
6.1	Considerações finais.....	124
7	CONCLUSÕES.....	125
7.1	Contribuições inovadoras da tese:.....	126
7.2	Sugestões de continuidade do trabalho:.....	126
7.3	Publicações de trabalhos relacionados à tese em Congressos:.....	127
7.4	Solicitação de Registro de Patente:.....	128
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129

1. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia fornecida pelas distribuidoras é regulada por normas e procedimentos de distribuição que visam garantir os parâmetros mínimos de atendimento para os consumidores e impõem multas e compensações para as empresas que não cumprem os limites estabelecidos.

A alocação dos equipamentos de controle de tensão e potência reativa, bem como os ajustes e as condições operacionais destes equipamentos são estudados e estabelecidos de forma a atender aos requisitos regulatórios e oferecer aos consumidores um fornecimento de qualidade. Além dessas condições, deve atender às restrições e objetivos das distribuidoras, contribuindo para a minimização das perdas técnicas e redução de multas e compensações, maximizando o fornecimento com tensão adequada e a vida útil dos equipamentos.

A grande quantidade de equipamentos para controle de tensão e o impacto de uma falha ou ajuste incorreto nestes equipamentos sobre a qualidade do fornecimento e geração de reclamações de tensão são significativos.

A automação da distribuição, muito utilizada atualmente para o telecomando de chaves seccionadoras e demais equipamentos de proteção e manobra, vem gradativamente sendo aplicada aos equipamentos de controle de tensão e potência reativa, alocados ao longo das redes de distribuição.

O crescente desenvolvimento das redes elétricas inteligentes (REI) proporciona às distribuidoras uma nova perspectiva em termos de informação, gerenciamento, operação e conhecimento do sistema de distribuição. Ações de reconfiguração, transferências de carga e alteração de parâmetros de equipamentos de forma automática, participação da geração distribuída (GD), supervisão, monitoramento, controle e aquisição de dados em tempo real são algumas das ações que já começam a ganhar espaço neste novo cenário da distribuição de energia elétrica.

Nesse contexto, o desenvolvimento de um algoritmo que possa ser implementado tanto no sistema SCADA, como embarcado nos dispositivos de controle, permitindo agregar as diversas funções associadas ao controle de tensão em tempo real é fundamental. A tese desenvolvida mostra ser viável implementar um controlador auto ajustável para reguladores de tensão e bancos de capacitores, que opere de maneira integrada, hierárquica e pró-ativa, em conjunto com o sistema SCADA e com os demais equipamentos presentes nos alimentadores. Com o desenvolvimento de módulos inteligentes para os reguladores de tensão (RT) associados

a novos algoritmos pode-se efetuar em tempo real a definição e adequação dos ajustes dos reguladores para quaisquer alterações percebidas no sistema seja em termos de carregamento ou devido a execução de manobras, seja sazonal ou inesperada. Quando integrados ao sistema SCADA permitirão a ação de um controle centralizado que monitore e se sobreponha aos ajustes dos reguladores, reduzindo os tempos de resposta com um número controlado de operações, reduzindo os riscos de transgressões de tensão por ações não coordenadas dos equipamentos. Na Figura 1.1, pode ser vista a camada do controle de tensão aplicada no decorrer da tese, onde são realizados desenvolvimentos vinculados às modernas ferramentas de controle aplicados aos dispositivos clássicos que são o regulador de tensão, nas redes de distribuição, e o relé 90, nos transformadores das subestações.

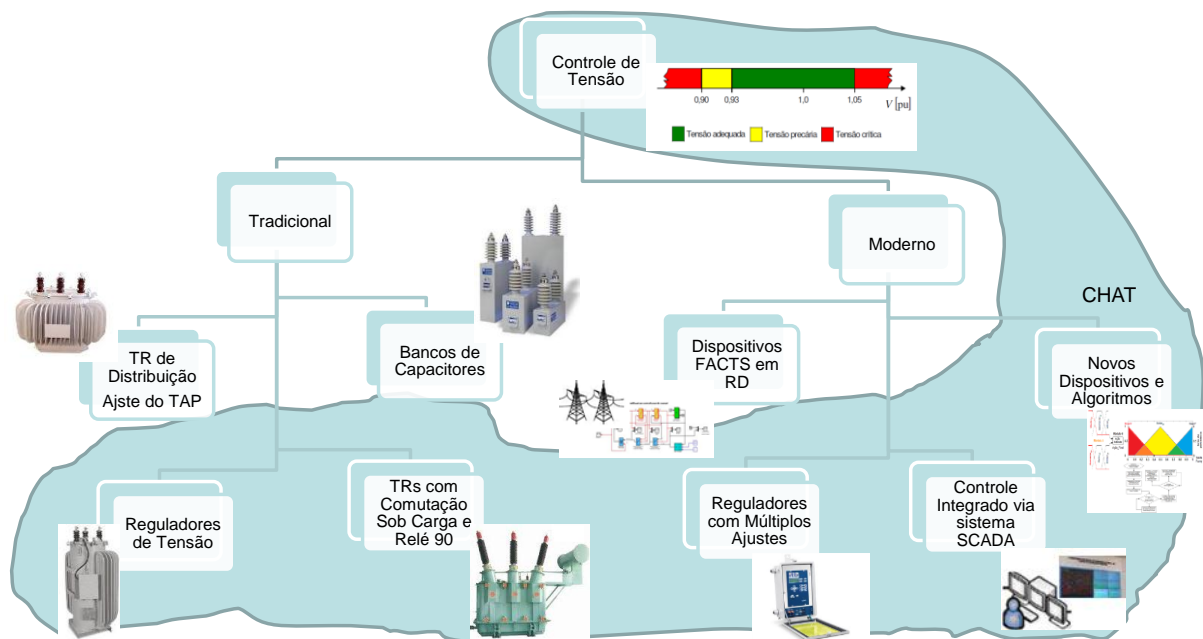


Figura 1.1 – Controle de Tensão nos Sistemas de Distribuição

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa forma de operação permite avaliar os ajustes das diferentes zonas de regulação e controle, atuando diretamente nos dispositivos, ditando ações de controle ou alterando parâmetros de ajuste para a melhoria do perfil do sistema.

1.1 Motivação e Justificativa

As redes inteligentes surgiram como uma resposta a grandes desafios do setor elétrico, como a maior preocupação com o desenvolvimento sustentável, e o crescimento da demanda de energia elétrica e da necessidade de melhoria na qualidade do serviço e do produto.

Dado este novo cenário, as ações de otimização da operação da rede terão impactos relacionados ao funcionamento dos reguladores de tensão, uma vez que diferentes configurações na topologia da rede podem alterar a quantidade de reguladores em série e o fluxo de carga nesses reguladores. No primeiro caso, pode-se citar que a mudança na configuração da rede primeiramente altera os níveis de tensão e carregamento, proporcionando uma alteração de seus parâmetros de tensão de referência, compensação de queda e insensibilidade. Com a alteração da quantidade de equipamentos em série é possível ainda uma alteração em suas temporizações para otimizar o tempo de resposta e o número de comutações nesses períodos. No segundo caso, a alteração no sentido do fluxo também exige uma avaliação dos parâmetros de fluxo inverso, da mesma forma considerando a quantidade de equipamentos em cascata e seus respectivos valores de temporização para a coordenação dos mesmos.

Em todos os casos, destaca-se a necessidade do uso de ferramentas computacionais para simulações, análises, e diagnósticos, antes da efetiva alteração dos parâmetros de ajuste dos equipamentos.

São necessárias avaliações em tempo real dos impactos desses novos ajustes para o sistema e para cada zona de regulação, e ainda uma análise da coordenação e hierarquia do controle. Além disso, o monitoramento dos equipamentos e a avaliação automática e periódica de seus ajustes contribuem para a garantia de níveis adequados de tensão no sistema. Isso se deve ao fato de que um ajuste incorreto ou a falha em um ou mais equipamentos representa um grande impacto no número de reclamações de tensão geradas e até classificadas como procedentes de acordo com a duração do defeito nos equipamentos.

O desenvolvimento desta tese é justificado principalmente pela importância do controle de tensão no contexto atual dos Sistemas de Potência e no panorama das redes inteligentes. Além disso, motivado por questões que relacionam estes temas, como a necessidade de alteração periódica nos parâmetros do regulador de tensão, a definição de um método automático para coordenar a temporização entre os reguladores, o efeito de ações de reconfiguração de redes sobre os reguladores, a possibilidade de utilizar temporização inversa sem aumentar o número de comutações desnecessárias e a ação coordenada dos reguladores para obter uma resposta mais rápida na melhoria do perfil de tensão. Estas são questões

fundamentais para o controle de tensão dos sistemas de distribuição e são os pilares para o desenvolvimento desta tese.

A forma de tratamento do tema é atual e inovadora, e desenvolverá aspectos ainda não abordados na literatura, dentre os quais destaca-se a operação integrada entre os dispositivos auto ajustáveis associados ao controle centralizado, aplicando uma hierarquia adaptativa dos reguladores de tensão nas redes de distribuição seja em condição normal de operação como sob condições de manobra.

1.2 Objetivos da Tese

O objetivo geral deste trabalho é:

- Desenvolver metodologia e algoritmo para o controle proativo de tensão que permita a integração entre os dispositivos de controle e o sistema SCADA possibilitando uma avaliação em tempo real dos ajustes dos equipamentos em malha fechada, em nível de sistema, para a realização de um controle integrado dos reguladores de tensão.

A partir deste, os objetivos específicos são:

- Pesquisar e desenvolver metodologias para o controle de tensão hierárquico e adaptativo em tempo real (o sistema é monitorado e os parâmetros dos controladores são recalculados e atualizados em tempo real) de redes de distribuição de energia, considerando o sistema em regime normal de operação ou sob condições de manobras realizadas com recursos de equipamentos telecomandados do sistema de potência;
- Desenvolver modelos para analisar, avaliar, ajustar, operar, supervisionar e simular o controle de tensão, sob o enfoque das REI;
- Realizar a análise dinâmica dos reguladores de tensão avaliando a influência e interação entre os equipamentos;
- Desenvolver algoritmos que possam ser aplicados diretamente nos controladores de tensão, com acesso direto à memória dos equipamentos a fim de distribuir o processamento dos dados para definição dos parâmetros de controle.

A metodologia desenvolvida será aplicada em um sistema de distribuição para validação e avaliação dos resultados.

1.3 Contribuições Inovadoras do Trabalho

Esse trabalho pretende contribuir com originalidade nos itens:

- a) desenvolvimento de uma metodologia global para o controle de tensão em tempo real, composta por módulos distribuídos e um controle hierárquico centralizado;
- b) desenvolvimento e aperfeiçoamento de modelos de controle para os reguladores de tensão, considerando as tecnologias e aplicações nas redes inteligentes;
- c) avaliação da operação dos reguladores de tensão considerando os efeitos das reconfigurações da rede de distribuição e as transições entre os patamares de carga;
- d) desenvolvimento de funções de auto ajuste dos reguladores de tensão otimizando o controle individual em nível local, considerando as heterogeneidades dos perfis de carga no sistema de distribuição;
- e) avaliação dinâmica dos reguladores considerando, além dos diversos parâmetros (tensão de referência, insensibilidade, temporização, tipo de temporização, tempo de comutação, compensação de queda na linha), a interação entre os equipamentos.

1.4 Organização dos Capítulos

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, incluindo este introdutório.

No Capítulo 2 é feita uma revisão dos métodos de controle de tensão utilizados no sistema de distribuição, juntamente com as metodologias utilizadas para alocação e ajuste dos mesmos. Também nesse capítulo será apresentada uma série de trabalhos relacionados ao controle moderno de tensão juntamente com ações de reconfiguração, automáticas ou não no contexto das redes inteligentes.

O Capítulo 3 traz uma breve contextualização do controle de tensão e dos recursos de automação da distribuição associados ao controle de tensão.

No Capítulo 4 encontra-se o detalhamento do controle hierárquico adaptativo de tensão, responsável pela temporização coordenada dos equipamentos e pelo controle centralizado. Além disso é apresentado um detalhamento do controle individual dos reguladores de tensão, encarregados da parcela adaptativa da metodologia.

O Capítulo 5 apresenta o estudo de caso, demonstrando através das simulações realizadas, os efeitos da aplicação da metodologia em diferentes cenários de carga e topologia, associadas à existência de reguladores em série.

No Capítulo 6 são apresentadas discussões sobre os resultados apresentados na aplicação prática e estudo de caso, bem como um comparativo entre as metodologias e cenários analisados.

No Capítulo 7 é apresentada uma análise final de resultados, conclusões e principais contribuições da tese.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo tem por objetivo apresentar uma síntese da revisão bibliográfica realizada sobre o tema de controle de tensão em redes de distribuição. Ele foi dividido em três partes principais que abordam controle de tensão tradicional, controle moderno de tensão, reconfiguração de redes de distribuição e redes elétricas inteligentes.

2.1 Controle de Tensão Clássico – Sem Automação

Neste item serão apresentadas as metodologias tradicionalmente utilizadas pelas distribuidoras para a alocação e definição dos ajustes dos meios de controle de tensão.

Estes métodos foram obtidos a partir de normas e procedimentos disponibilizados pelas empresas, manuais de fabricantes e pela experiência de profissionais e especialistas da área.

Com base na variação de tensão e da carga entre os patamares de carga leve e pesada, seja através de medições ou de simulações e estudos de fluxo de potência são definidas as configurações para os Terminais de Ajustes de Potencial (TAP) dos transformadores das subestações quando fixos. Em caso de equipamentos que possuem o comutador de derivações sob carga, motorizado e controlado pelo relé 90, os estudos são utilizados para definir os ajustes do relé. Algoritmos como os desenvolvidos por Milbradt (2008) auxiliam nesta definição ao apresentar a lei de controle de tensão indicando a faixa esperada de tensão em função da variação da carga. Outros trabalhos como Lemos (2002), Feijó (2002) e Felber (2010) também avaliam o controle de tensão nas subestações estabelecendo métodos para a coordenação da temporização e do tipo de operação dos relés 90 visando reduzir o número de comutações dos comutadores de derivação sob carga (CDC).

Fora das subestações, os reguladores de tensão são amplamente utilizados para a regulação e a compensação da queda de tensão nas redes de distribuição. Para a alocação destes equipamentos ao longo das redes são disponibilizadas diversas metodologias, utilizando as mais variadas técnicas. Madruga (2009) utiliza algoritmos genéticos para a alocação ótima dos bancos de reguladores e capacitores. Pereira (2009) aplica um método heurístico, considerando a minimização da queda de tensão e das perdas, além de considerar os custos de investimento. Kersting (2010) indica que ferramentas de fluxo de potência podem ser utilizadas para determinar a localização bem como os ajustes dos equipamentos, método utilizado por muitas distribuidoras que realizam esta atividade associada à experiência de profissionais que atuam no setor. Utilizando critérios próprios definidos nas empresas, os equipamentos são alocados e

ajustados, talvez não de maneira ótima, mas com algum resultado na melhoria da qualidade do fornecimento, compensando os níveis de queda de tensão e possibilitando regulação de tensão. Porém dependendo das condições do ponto de instalação ou dos ajustes realizados, pode ocorrer um número elevado de comutações, ou o regulador pode permanecer a maior parte do tempo em uma posição de TAP elevada sem condições de regulação.

Métodos e filosofias de ajustes dos equipamentos, muitas vezes transferidas de um profissional para outro, ou pela experiência adquirida ao longo do tempo apresentam regras que atendem aos critérios das distribuidoras, mas que deixam algumas dúvidas frente a possibilidade de melhoria do controle de tensão. Por exemplo, questões como a coordenação entre os equipamentos, sendo recomendado em Toshiba (2009) e Harlow (2012) um intervalo de 15 s entre os equipamentos em cascata. O número de reguladores de tensão em série, que conforme CELTINS (2009), não deve ser superior a três. Há também a resistência por muitos profissionais para a utilização da temporização inversa, pois aumenta significativamente o número de comutações nos reguladores, entre outras.

Através da automação e do monitoramento dos reguladores de tensão é possível esclarecer algumas destas questões. Um estudo aprofundado sobre a influência do tipo de temporização e dos tempos de ajuste definidos torna-se necessário para avaliar se os atuais equipamentos podem ser melhor aproveitados. Também é preciso identificar a necessidade de funções adicionais para garantir uma melhor regulação de tensão com o menor desgaste possível dos equipamentos.

Os bancos de capacitores são também aplicados nas redes de distribuição com o intuito de elevar os níveis de tensão, sendo este um benefício secundário, uma vez que os objetivos principais são reduzir as perdas no alimentador, melhorar o fator de potência e aumentar a disponibilidade de carga no sistema. Da mesma forma como nos reguladores de tensão, diversas metodologias foram desenvolvidas nos últimos anos para a compensação de reativos nas redes de distribuição. Normativas próprias ou algoritmos são utilizados como apoio para os responsáveis pela alocação destes equipamentos. Algumas recomendações, como CELG (1996), por exemplo, indicam que os bancos de capacitores devem ser alocados em pontos situados a uma distância equivalente da SE igual a $2/3$ do comprimento do alimentador e com potência igual a $2/3$ do fluxo máximo de reativo da rede. Para otimizar o sistema técnicas de otimização e heurísticas, são utilizadas objetivando o melhor aproveitamento dos capacitores considerando em suas formulações a aplicação de bancos fixos e automáticos. Por exemplo, em Haffner (2009) é apresentado um modelo de otimização para a alocação de capacitores com objetivo de eliminar as violações de tensão, enquanto que Ahn (2007) trabalha com a

compensação reativa utilizando bancos relocáveis. Conforme descrito por Alcântara (2005), a escolha do algoritmo apropriado a ser usado para alocação de capacitores depende da topologia, do comprimento da rede de distribuição, da precisão desejada, dos dados disponíveis do sistema e de recursos de pessoal.

Além destas, várias ações estruturais são efetuadas para melhorar as condições de atendimento das redes de distribuição, como divisão de alimentadores de distribuição, reforço de redes realizados com o aumento da seção dos condutores, implantação de novas subestações, dentre outras medidas. Porém dadas as variações de cargas ocorridas ao longo do dia fica evidente a necessidade de um efetivo controle para manter os níveis de tensão de atendimento dentro de limites adequados.

2.2 Conceito de Redes Elétricas Inteligentes

Embora muitos conceitos relacionados às Redes Elétricas Inteligentes sejam objetos de estudo há bastante tempo, tais como geração distribuída, sistemas de potência automatizados, medição eletrônica, sistemas de comunicações específicos para redes de distribuição, entre outros, o tema é relativamente novo, e ganhou força a partir do início desse século.

Os recursos de automação utilizados nos equipamentos especiais das redes de distribuição, como por exemplo, religadores, bancos de capacitores e reguladores de tensão, além da evolução dos medidores e dos sistemas de comunicação, ao mesmo tempo em que oferecem diversas novas funções para a melhoria da operação do sistema, exigem a integração entre as áreas e essas novas funções de controle. Essa evolução leva o sistema de distribuição para um patamar no qual algoritmos diversos e equipamentos atuam como ferramentas de apoio para os operadores e alteram a configuração do sistema de modo a torná-lo mais eficiente e robusto. Na Figura 2.1 tem-se uma visão geral do sistema com a aplicação desses recursos.

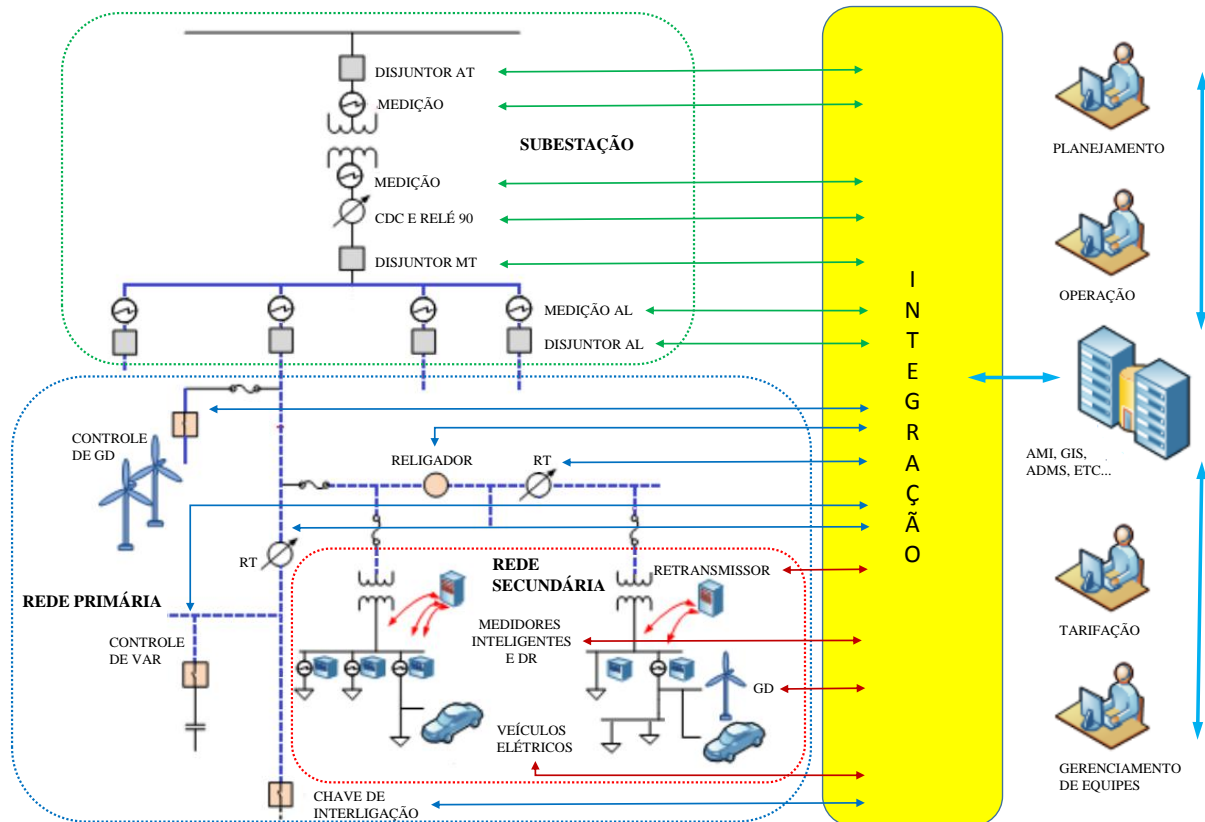


Figura 2.1 – Automação e Comunicação em uma Rede Inteligente

Fonte: Adaptado de Pfitcher 2013

Conforme Falcão (2012), inúmeros são os motivos que levam a necessidade de uma rede inteligente, dentre os quais a melhoria da confiabilidade, a redução das perdas e dos custos operacionais. A inteligência da rede encontra-se como a camada integradora dos diversos recursos através do desenvolvimento dos métodos e aplicações para os diferentes objetivos de cada bloco, compondo um sistema avançado de gerenciamento da distribuição.

Diversos grupos, consórcios e comissões de estudo e trabalho sobre o assunto foram formados a partir de 2000, conforme apresentado de forma resumida em Brown (2008). O autor faz uma avaliação do impacto da tecnologia no projeto das redes, procurando responder se a topologia e o *layout* de uma Rede Elétrica Inteligente serão similares ao que temos hoje. No aspecto da automação da distribuição, o autor defende que uma rede inteligente não implica simplesmente em conectar consumidores a subestações pelo menor custo; ao invés disso, ele considera que a rede é um sistema que deve ser reconfigurado de maneira rápida e flexível. O foco, nesse caso, muda dos alimentadores para o sistema de interconexão dos alimentadores. Ele conclui que a mudança do atual sistema, que não foi pensado como uma Rede Inteligente,

para um novo, deve ser feita de forma gradativa. Nesse contexto, o controle de tensão deve ter a robustez necessária para garantir os níveis de tensão adequados para esse sistema de alimentadores em qualquer condição operativa de regime normal de operação. Um sistema de controle de tensão adaptativo em tempo real possibilita atender a estes requisitos adequando os reguladores de maneira rápida as diferentes condições topológicas da rede. Jauch (2009) classifica o gerenciamento volt/var como uma essencial função “*Smart*” e salienta que os benefícios não podem ser obtidos pela operação individual e não coordenada dos equipamentos de controle.

2.3 Controle Moderno de Tensão nas Redes de Distribuição

Graças à automação da distribuição e o desenvolvimento das redes elétricas inteligentes, muitos estudos estão sendo realizados permitindo a modernização do controle de tensão para as redes de distribuição. O uso de sistemas de comunicação, desenvolvimento de algoritmos inteligentes, novas funções nos controladores possibilitando ajustes diferenciados trouxeram novas perspectivas para o controle de tensão.

Métodos de avaliação e tomada de decisão incluem o tratamento de múltiplos pontos de vista e sua aplicação permite priorizar ou reduzir os vários fatores que devem ser levados em consideração. Neste sentido, diferentes abordagens vêm sendo adaptadas e utilizadas, como o processo de hierarquias analíticas e árvores de relevância, de tal forma que o controle possa expressar preferências com intervalos de julgamento e estabelecer prioridades através de pertinências. (AGUIAR, 2007).

Para destacar a importância de técnicas aplicadas nos processos de avaliação e tomada de decisão, a seguir são referenciados trabalhos que aplicam métodos baseados na inteligência computacional como ferramenta de apoio operacional para o controle inteligente de tensão, além do desenvolvimento de novos equipamentos que possibilitam uma evolução do controle de tensão tradicional.

O regulador de tensão apresentado por Carraro (2006) permite a parametrização de múltiplos ajustes, permitindo que sejam consideradas várias condições de carregamento do sistema. Nessa forma de controle, as condições devem ser analisadas previamente, exigindo um forte conhecimento sobre o comportamento da carga em cada zona de regulação para possibilitar uma parametrização eficiente do equipamento. Este controlador permite que sejam realizados ajustes diferentes para determinados períodos do dia e/ou para diferentes dias da

semana. No entanto, o recurso de múltiplos ajustes torna-se quase desnecessário quando utilizada a abordagem do controle centralizado.

A inserção de módulos inteligentes nos relés reguladores de tensão é proposta por Spatti (2007) para flexibilizar o ajuste de tensão. Neste caso, o regulador de tensão considera as variáveis elétricas do sistema e aplica Lógica *Fuzzy* para um controle adaptativo da referência. No método apresentado ele considera a utilização de uma tensão de referência variável calculada a partir de um módulo auxiliar acoplado ao relé do regulador de tensão. Nesse caso ao invés de uma série de ajustes, o sistema proposto aplica diferentes valores de tensão de referência considerando as variações de tensão e de carga. O estudo foi direcionado a subestações de distribuição e limitado ao controle no barramento secundário. Através de resultados obtidos apresenta um ganho de tensão em diferentes patamares de carga. Um relé inteligente também é proposto por Usida (2007), cujo trabalho investiga os principais aspectos relacionados ao controle de tensão e apresenta estudo sobre melhoria do perfil de tensão através da comutação de TAP em transformadores de potência instalados em subestações de distribuição. A inteligência do relé regulador de tensão está baseada em sistemas *Fuzzy* e a implementação foi realizada por meio de um algoritmo computacional utilizando o software Matlab. Os resultados de aplicabilidade realizados consideraram diferentes patamares de carga.

A aplicação de Lógica *Fuzzy* para o controle de tensão apresentada por Miranda et al. (2007), o qual descreve o conceito de um controlador de tensão volt/var, baseia-se na interação de controladores *Fuzzy* do tipo Mandami. O qual ajusta a sensibilidade conforme o perfil de carga e mantém a tensão dos barramentos dentro dos limites admissíveis.

Para viabilizar a análise da tensão no sistema, Guimarães (2008) recorre a métodos probabilísticos e a Lógica *Fuzzy*, para desenvolver metodologia alternativa aos métodos tradicionais de fluxo de potência. Em seguida, realiza aplicações para avaliar os riscos de violações de conformidade de tensão em sistemas de distribuição de baixa tensão.

O estudo de Almeida (2009) aplica inteligência computacional no planejamento de reguladores de tensão através de Algoritmos Genéticos e Lógica *Fuzzy*. Também destaca o referencial bibliográfico pertinente à utilização da Lógica *Fuzzy* em sistemas elétricos de potência.

O trabalho de Malange (2010) discorre sobre a atualização dos conceitos de qualidade de energia elétrica e apresenta alternativas para aplicação de inteligência computacional no tratamento dos fenômenos relativos à conformidade de tensão. Por último, compara diferentes combinações de técnicas de inteligência artificial e apresenta um método para classificação de distúrbios.

Em confronto aos métodos tradicionais de controle de tensão, Oliveira (2010) destaca a ineficácia dos compensadores de queda na linha (do inglês, *line drop compensator* – LDC) e apresenta um simulador para identificar alternativas de ajuste do nível de tensão nas redes de distribuição que utilizam bancos trifásicos de reguladores de tensão.

Outros trabalhos publicados nos últimos anos abordam o controle inteligente de tensão, neste contexto, Fu (2006), Macbee (2009; 2012) Albu (2010) e Acampora (2011) demonstram diferentes alternativas para o monitoramento e controle da tensão no cenário das redes inteligentes.

Independentemente da lógica de controle utilizada, o desenvolvimento de novos reguladores ou de comutadores rápidos trazem grandes vantagens em termos de qualidade da energia, uma vez que o tempo de comutação é um fator de extrema importância para a regularização da tensão. Exemplos desse desenvolvimento são apresentados por Aredes (2008) e Oliveira (2007), que propõem um comutador eletrônico de TAP's para os reguladores de tensão. A substituição da parte ativa do regulador, atualmente eletromecânica, por tiristores garante um tempo de resposta muito menor do que os reguladores convencionais. Desta forma as variações de tensão são rapidamente corrigidas possibilitando inclusive a compensação de variações de tensão de curta duração. Os resultados obtidos neste estudo foram baseados em simulações e preveem o desenvolvimento de um protótipo para aplicação em redes reais.

Com um custo significativamente menor, podem também ser aplicados comutadores rápidos (COOPER, 2012) que utilizam motores síncronos permitindo reduzir o tempo entre comutações para a casa dos milissegundos, tendo valores típicos na ordem de 250ms. Estes, significativamente mais rápidos do que os convencionais que operam com valores na faixa de 3s a 5s, apresentam-se como uma solução competitiva dos reguladores convencionais frente aos tiristorizados.

A coordenação do controle de tensão entre os diversos equipamentos do sistema é de grande importância para a utilização mais racional dos equipamentos, uma vez que podem ocorrer comutações consideradas desnecessárias quando existem controladores em série. Nesses casos uma grande variação de carga pode sensibilizar a atuação de vários reguladores e à medida que a tensão vai sendo regularizada pelas comutações dos reguladores a montante, os equipamentos situados mais ao final da rede tendem a "desfazer" algumas comutações realizadas devido a sua temporização, aumentando o número de comutações do equipamento.

Em Borozan (2001) são propostos esquemas para controles supervisórios possibilitando controle integrado de tensão e potência reativa, realizando comparativos entre a operação

convencional, controle de bancos de capacitores e controle integrado de tensão e potência reativa visando a redução das perdas no sistema.

O controle hierárquico proposto por Lemos (2002) apresenta o desenvolvimento de um algoritmo para a coordenação entre a temporização dos reguladores de tensão da subestação, integrado ao sistema SCADA, considerando o modo de operação com comutações não sequenciais, nas quais cada comutação é precedida pela temporização ou *delay* definido. Esse algoritmo visa à coordenação entre os equipamentos para evitar comutações desnecessárias, porém sendo necessária a definição da hierarquia de controle para cada subsistema analisado.

Dando continuidade àquele trabalho, Bremermann (2008) desenvolveu uma metodologia de controle de tensão e potência reativa baseada em controle centralizado, composto por uma cascata de controladores *Fuzzy*. A metodologia proposta executa a coordenação conjunta de equipamentos instalados nas subestações e ao longo dos alimentadores. O algoritmo executa fluxo de potência baseado em curvas de carga históricas e gera os comandos em tempo real conforme o carregamento do sistema.

Mais recentemente Zavoda (2010), traz aplicações de automação da distribuição direcionadas para a qualidade da energia e as *Smart Grids*. No contexto de controle de tensão e energia reativa, apresenta uma estratégia, chamada CATVAR, baseada na redução dos níveis de tensão nos reguladores e na aplicação de bancos automáticos de capacitores para a melhoria do perfil de tensão e redução de perdas e da queda de tensão no sistema. Ranamuka (2013) apresenta uma estratégia de controle *on line* para redes de distribuição com múltiplos dispositivos de controle de tensão. Trabalha com um controle centralizado que atua sobre os reguladores de tensão, realizando o bloqueio das operações simultâneas e nas máquinas síncronas das unidades de geração distribuída, nas quais opera alterando o valor da tensão de referência.

Outros estudos são também apresentados, cada um com sua respectiva contribuição para o sistema, atendendo suas restrições específicas, permitindo conhecer melhor algumas características da rede ou criando indicadores para a aferição da eficácia do método empregado auxiliando direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho.

Guimarães (2006) baseia-se no cálculo do fluxo de potência probabilístico e fluxo de potência utilizando lógica *Fuzzy* para estimar os indicadores das transgressões de tensão nos alimentadores de distribuição. O indicador de energia fornecida fora de padrão (EFPF), utilizado em Milbradt (2009), permite avaliar as transgressões de tensão e avaliar o resultado das ações de determinação da lei de controle de tensão para os alimentadores de distribuição.

A consideração dos indicadores relacionados com as possíveis transgressões de tensão, ou ainda a estimação dos indicadores regulatórios de duração relativa da transgressão de tensão precária (DRP), duração relativa da transgressão de tensão crítica (DRC) ou do índice de unidades consumidoras com tensão crítica (ICC), é de grande valia para o sistema de controle de tensão, pois permite medir o ganho obtido considerando as diferentes alternativas de coordenação entre os equipamentos. Além disso, mostra-se interessante como forma de auxiliar no planejamento dos sistemas de distribuição, uma vez que apresentam um indicativo da condição do alimentador em termos de transgressão das faixas de tensão, permitindo que as distribuidoras tenham uma estimativa de potenciais zonas de reclamações de tensão. O cálculo em tempo real de indicadores como estes pode ser utilizado como critério para a parametrização dos ajustes dos reguladores e como alarmes de áreas críticas do sistema quando associado ao monitoramento com sistemas supervisórios.

2.4 Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se uma revisão dos principais métodos e conceitos aplicados no controle de tensão de redes de distribuição que abrangeu novos trabalhos desenvolvidos para este tema. Muitos trabalhos apresentam evoluções de técnicas bastante conhecidas, com o objetivo de melhorar o desempenho dessas técnicas quando aplicadas em Sistemas de Potência.

A evolução do controle de tensão associado aos recursos de automação da distribuição e aos recursos para o desenvolvimento das redes inteligentes permite a avaliação constante dos reguladores de tensão. Elimina a necessidade de deslocamento de equipes e a preocupação com a logística para a alteração de parâmetros de controle em diversos equipamentos, reduzindo assim os custos com deslocamentos. Além disso a redução no número de reclamações geradas permite à distribuidora evitar o pagamento de compensações (ou reduzir seu montante) uma vez que os níveis de tensão são constantemente monitorados nos pontos de controle e avaliados em todo o sistema com o uso de algoritmos específicos e estimadores de estado.

A coordenação e hierarquização dos diversos dispositivos de controle, juntamente com a realização de um controle que se adapta à dinâmica da carga e à dinâmica do sistema elétrico são objetivos comuns entre as referências apresentadas e a tese proposta, porém o principal diferencial a ser desenvolvido neste trabalho é que essas ações, tanto de definição da hierarquia de controle como as alterações nos parâmetros dos dispositivos devem ser realizadas em tempo real, com parâmetros calculados individualmente em cada equipamento aplicados de maneira transparente para o operador do sistema

Nessa linha, o desenvolvimento da proposta de um controle integrado de tensão, associado à aplicação de recursos de automação da distribuição e as redes elétrica inteligentes, para a alteração em tempo real dos parâmetros de ajuste dos reguladores de tensão representam a base para a tese desenvolvida neste trabalho, sendo este uma evolução do trabalho desenvolvido no curso de mestrado onde foi desenvolvido um algoritmo heurístico para definição dos ajustes dos reguladores de tensão. A metodologia apresentada considera a influência das zonas de TAP, ou seja, a definição das posições de TAP de cada transformador de distribuição com base na tensão primária fornecida para cada patamar de carga, e a quantidade de transformadores sujeitos a tensão inadequada para a determinação da faixa de operação e nos parâmetros de tensão de referência e compensação da queda de tensão na linha.

3 CONTROLE DE TENSÃO E AUTOMAÇÃO

Nesse capítulo será apresentada uma breve contextualização dos aspectos de automação relacionados ao controle de tensão. A automação da distribuição, muito utilizada atualmente para o telecomando de chaves seccionadoras e demais equipamentos de proteção e manobra, vem gradativamente sendo aplicada aos equipamentos de controle de tensão e potência reativa, alocados ao longo das redes de distribuição.

3.1 Recursos de Automação e os Reguladores de Tensão

A automação de um sistema de distribuição, de acordo com o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), consiste na combinação de subsistemas de automação que permitem a distribuidora monitorar, coordenar e operar os componentes de um sistema elétrico, em tempo real. Esta definição considera subsistemas que, comumente, são abordados separadamente, tais como supervisão e controle de subestações, supervisão e controle da rede de distribuição, entre outros. (CRISPINO et al., 2000).

Há muitos anos a ideia de monitorar e controlar remotamente a rede elétrica vem sendo abordada (PFITSCHER, 2013). Dados os avanços tecnológicos, o desenvolvimento de infraestruturas de redes, o aprimoramento de sensores e de meios de comunicação, a automação tornou-se possível. (SPERANDIO, 2008). Assim, percebe-se uma tendência crescente, por parte das empresas, em optar pela automação das redes de distribuição. Aliada a custos cada vez mais acessíveis, esta escolha se deve também a flexibilidade operativa e a inúmeras vantagens que o uso deste tipo de tecnologia proporciona. A possibilidade de controlar e monitorar o sistema em tempo real, manobras de transferência de carga e outras ações de automação aliadas ao desenvolvimento das redes elétricas inteligentes, são alguns exemplos que trazem resultados diretos à melhoria das condições de atendimento. Estes benefícios geram uma melhora nos indicadores de continuidade, na redução dos tempos de atendimento e de interrupção do sistema, melhoria na qualidade, confiabilidade e nos custos de operação, uma vez que se torna possível otimizar a utilização de recursos, como equipes de manutenção e deslocamento da frota de veículos.

No caso do controle de tensão, a automação consiste na aplicação de equipamentos destinados à melhoria dos níveis de tensão aliados ao sistema de comunicação e as funções de monitoramento e controle permitindo identificar as condições operativas dos equipamentos, a avaliação das grandezas elétricas, adequação dos parâmetros e intervenção remota. Além disso,

estes equipamentos exercem influência uns sobre os demais e por isso se faz necessária a realização de uma avaliação integrada sob os aspectos de tensão e potência reativa, identificando a melhor forma de operação dos reguladores de tensão bem como a dos bancos de capacitores automatizados.

A aplicação da automação foi inicialmente utilizada como monitoramento e supervisão dos equipamentos, permitindo monitorar as principais grandezas elétricas e algumas variáveis de interesse dos dispositivos, como por exemplo, os estados dos religadores ou chaves, indicando se o equipamento está aberto ou fechado, a posição de TAP de um regulador de tensão, os níveis de potência ativa e reativa em um determinado trecho da rede, o nível de corrente em cada fase na ocorrência de um curto circuito, entre outras informações relevantes.

Gradativamente estas funções foram sendo ampliadas e as possibilidades de utilização dos equipamentos remotamente foram sendo multiplicadas. Desse modo, é possível classificar a automação dos equipamentos utilizados nas redes de distribuição em vários níveis, descritos abaixo.

- a) Nível 0: operação local não supervisionada;
- b) Nível 1: comunicação e uso de software proprietário - consultas esporádicas e alteração dos parâmetros;
- c) Nível 2: sistema supervisório - monitoramento, alarmes e alteração de parâmetros (ajustes estabelecidos pelos técnicos e implementados remotamente);
- d) Nível 3: supervisão e controle - Nível 2 com ajustes definidos por algoritmos inteligentes;
- e) Nível 4: hierarquia e coordenação entre equipamentos e ferramentas de auto ajuste embarcadas tornando cada equipamento independente do sistema de comunicação com o centro de operação.

Tendo os reguladores de tensão a finalidade manter um determinado nível de tensão em um sistema elétrico, quando o mesmo for submetido a uma variação de tensão fora dos limites especificados. (MAMEDE, 2011). O telecomando de reguladores de tensão possibilita o ajuste e monitoramento remoto dos mesmos.

No caso dos reguladores de tensão as principais condições de monitoramento estão relacionadas com os níveis de tensão, carregamento, sentido de fluxo e posições de TAP. Estas informações são de grande importância principalmente nos casos de transferências de cargas entre redes e alimentadores ou execução de manobras de reconfiguração que resultam em

alterações na topologia da rede. Em geral, os reguladores estão ajustados e posicionados para uma determinada condição de operação, considerando a configuração original da rede elétrica, como exemplificado na Figura 3.1.

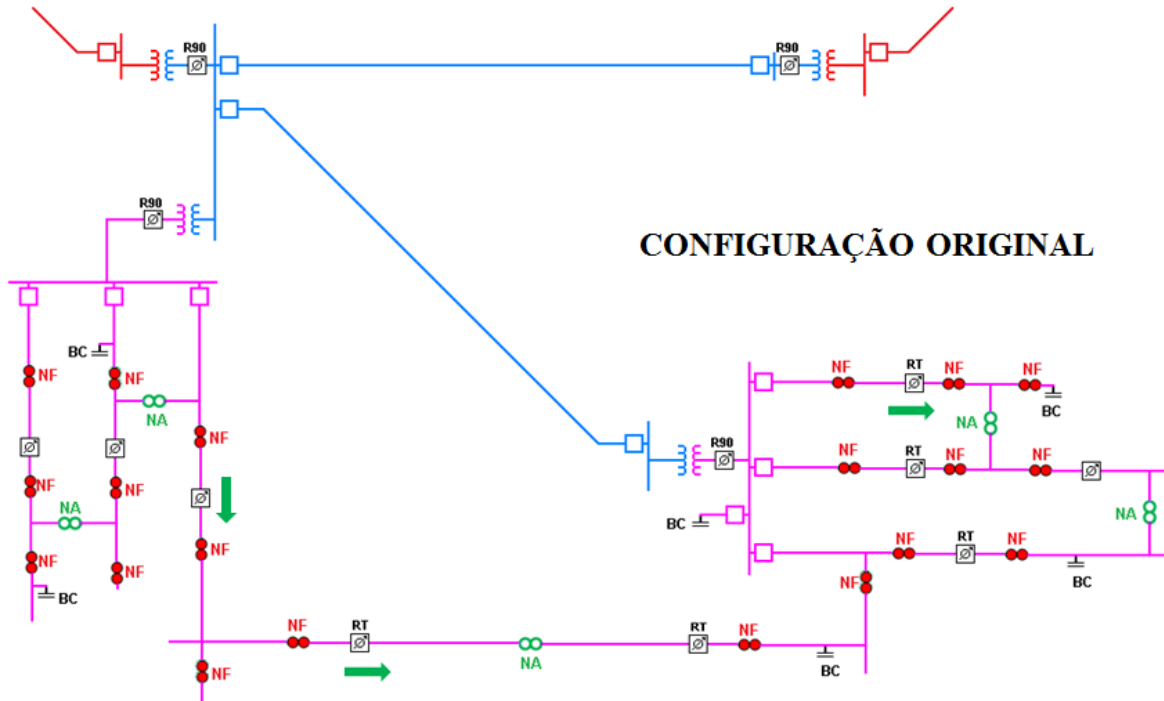


Figura 3.1 – Sistema elétrico em sua configuração original

Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, a execução de manobras altera as características do sistema, podendo causar alterações no perfil de carga, sentido de fluxo e até mesmo alterações nos ajustes dos reguladores, conforme apresenta a Figura 3.2. Assim, dependendo do nível de automação dos reguladores de tensão essas condições podem ser tratadas de diferentes formas. No caso de operação em nível 0, o regulador de tensão deve ser analisado previamente e caso possua opção de operação em fluxo inverso esta deverá ser adequadamente ajustada para as possíveis inversões no fluxo de carga. Se houver a opção de operação em sobrecarga este deverá ser ajustado, reduzindo o ganho de tensão. Não sendo disponibilizada a operação em fluxo inverso ou havendo a necessidade de alterações de algum parâmetro, será necessário o deslocamento de equipes para a execução das configurações.

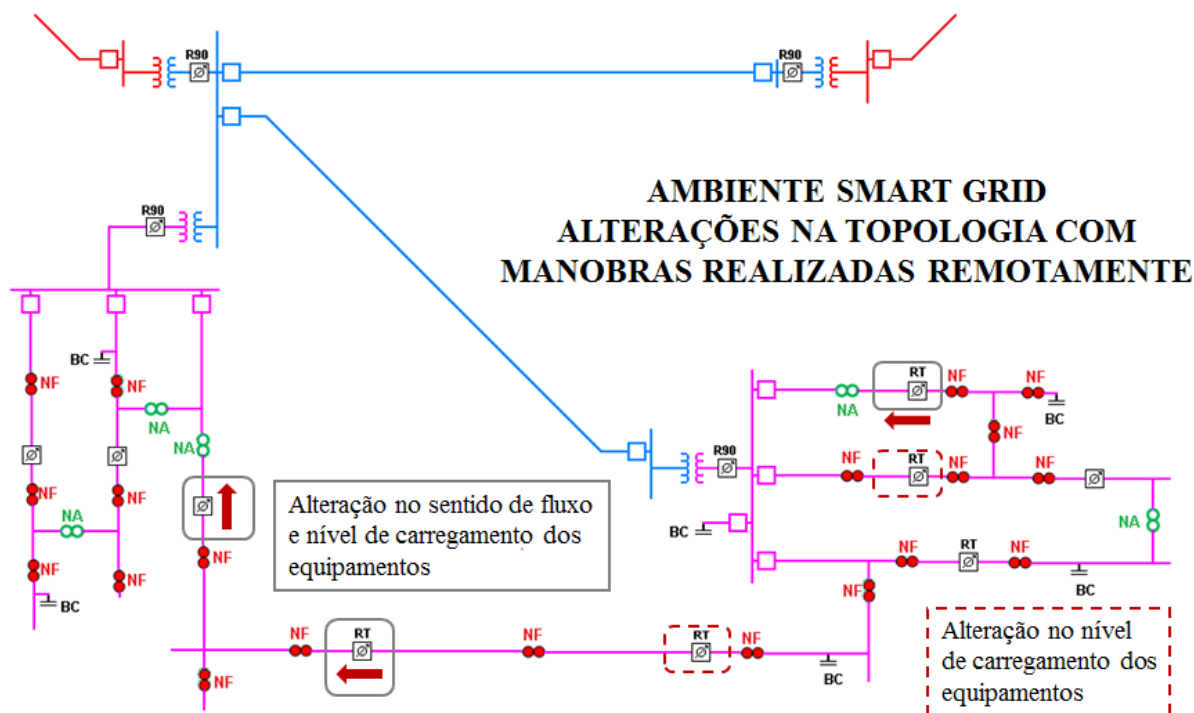


Figura 3.2 – Sistema reconfigurado, alterações das condições operativas da rede e reguladores

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em nível 1, a alteração dos parâmetros poderá ser realizada remotamente, porém, os equipamentos sem fluxo inverso, estes deverão ser retirados de operação, estabelecendo um TAP adequado que deverá ser fixado da melhor forma. No entanto estas alterações devem ser estudadas previamente e dependem de um software específico para cada marca e modelo de regulador de tensão.

Os equipamentos operando em nível 2, permitem o monitoramento constante através do sistema supervisor, com geração de alarmes estabelecido para condições específicas. Neste caso as alterações podem ser realizadas remotamente, através de protocolos padronizados, sem a necessidade de uso de softwares proprietários. Ainda existe a necessidade de estudos prévios porém a aplicação dos parâmetros e a operação dos equipamentos torna-se facilitada.

A aplicação do nível 3, permite que o sistema centralizado, através das informações do supervisor, indique os melhores ajustes para cada condição, cabendo aos operadores aceitar estas alterações para implementação nos equipamentos. Neste caso as avaliações são realizadas quase que em tempo real, agilizando o processo de adequação do sistema as novas condições operativas.

Por fim na operação em nível 4, os equipamentos terão os ajustes realizados individualmente, conforme a condição operativa de cada um. Cabe ao controle centralizado o

monitoramento das grandezas e estados via sistema de supervisão e a partir daí estabelecer ações em tempo real para que se obtenha resultados mais rápidos com o menor desgaste dos equipamentos.

Assim, o desenvolvimento da tese propõe a automação dos equipamentos em nível 4, aplicando novos algoritmos, controles e dispositivos, associados ao sistema supervisor, integrando técnicas do controle moderno ao controle clássico de tensão.

Em termos de supervisão, uma série de alarmes pode ser configurada considerando as influências sobre os reguladores de tensão. Os exemplos apresentados na Tabela 3.1 são algumas das possibilidades de monitoramento que podem ser realizadas nos reguladores de tensão e desencadear uma série intervenções e ações de controle.

Tabela 3.1 – Condições operativas dos reguladores, alarmes e possíveis ações de controle

Situação	Alarme	Possibilidade de ação de controle
Fluxo inverso	Inversão de Fluxo no RT	Verificação de operação em fluxo inverso Análise e adequação dos ajustes Ativação do modo de operação em fluxo inverso, Cálculo da posição de TAP específica para operação Bloqueio do RT
Elevar Nível de Tensão	Nível de Tensão Baixo	Verificar posições de TAP necessárias para adequação dos níveis de tensão. Verificar atuação de reguladores a montante Atuar nos dispositivos elevando os níveis de tensão
Abaixar Nível de Tensão	Nível de Tensão Elevado	Verificar posições de TAP necessárias para adequação dos níveis de tensão. Verificar atuação de reguladores a montante Atuar nos dispositivos reduzindo os níveis de tensão
Sobrecarga	Regulador em Sobrecarga	Verificar níveis de sobrecarga; Limitar ganho de tensão habilitando a função <i>load bonus</i> ; Verificar ação de reguladores a montante para reduzir efeitos da limitação dos TAPs;
TAP Limite Alcançado	Regulador em TAP limite	TAP limite do regulador alcançado; Verificar uso da função <i>load bonus</i> Verificar Ação dos reguladores a montante Rever ajustes dos reguladores adequando o ganho de tensão
Posição de TAP Neutro	Regulador em TAP Neutro	Verificar Ação dos reguladores a montante Rever ajustes dos reguladores adequando o ganho de tensão Verificar possibilidade de adequação do ponto de instalação do RT

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sem a utilização dos recursos de automação, os dados referentes a esta série de alarmes só podem ser obtidos através do deslocamento de equipes ao local e a coleta dos dados de memória dos equipamentos. Porém esse método só permite a avaliação a posteriori, eliminando possibilidade de agir no momento de uma dada ocorrência, corrigindo ou adequando parâmetros, ou ainda realizando ações em outros equipamentos que podem influenciar de maneira significativa a regularização do sistema.

Além dos alarmes e monitoramento de grandezas armazenadas nos equipamentos a aplicação da automação possibilita alterar os principais parâmetros de controle dos reguladores e tensão. Desde os ajustes básicos de tensão de referência até a definição do modo de operação e ajustes de temporização ou envio direto de comandos como elevar e abaixar posições de TAP.

Dentre os ajustes considerados no sistema de controle o tipo de temporização representa grande importância e influencia diretamente no número de comutações dos equipamentos. Os reguladores, sejam utilizados nas redes de distribuição, sejam relés dos CDCs das subestações, podem operar com dois tipos de temporização, apresentados na Figura 3.3, chamadas de temporização linear e temporização inversa, ou integral.

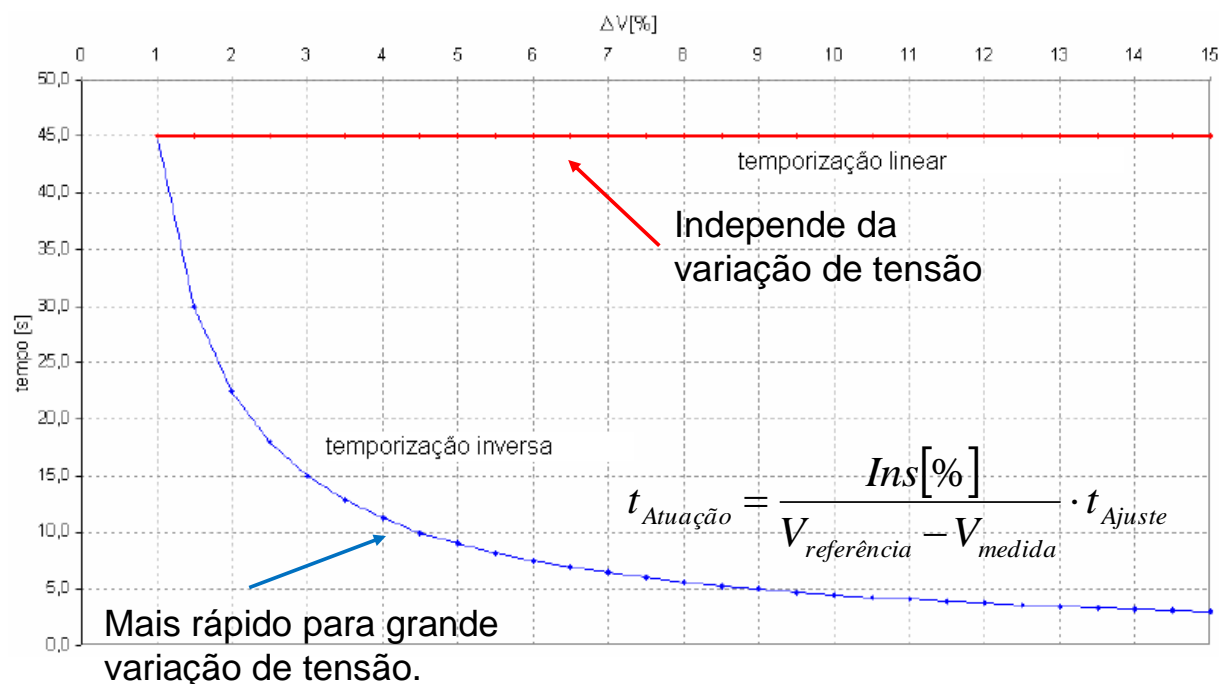


Figura 3.3 – Modos de temporização dos reguladores de tensão

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da temporização linear, o tempo de espera até a primeira comutação é constante, independente da severidade da variação da tensão. Aplicando o modo de temporização inversa,

o início do processo de comutação se dá de forma inversamente proporcional, sendo que quanto maior for a variação de tensão menor será o tempo de espera.

Além da temporização, o modo de operação dos equipamentos exerce influência no número de comutações dos reguladores e no tempo total de adequação da tensão. No caso dos reguladores presentes nas subestações, responsáveis pelo comando dos CDCs, é possível escolher entre um modo de operação sequencial e não sequencial, apresentados na Figura 3.4. A diferença entre estes modos de operação está no fato de que no modo não sequencial, existe, além do tempo de comutação, um tempo de espera entre cada comutação. Este tempo, diferente do tempo de espera até a primeira comutação, corresponde a um parâmetro de ajuste do relé. No caso da operação sequencial, as comutações são realizadas sequencialmente após a primeira comutação, existindo apenas o tempo de comutação.

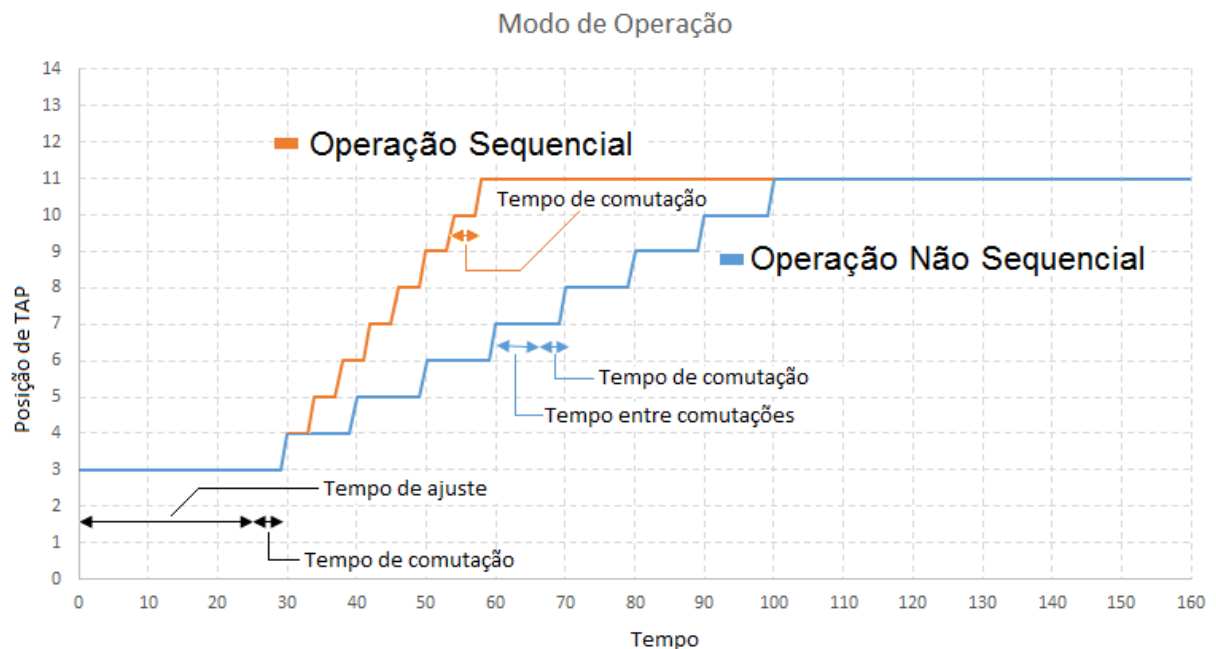


Figura 3.4 – Composição dos diferentes modos de operação dos reguladores de tensão

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso dos reguladores de distribuição, existe apenas o modo de operação sequencial. O modo não sequencial é comumente utilizado nos reguladores das subestações com o objetivo de preservar o comutador, aumentando o seu período entre manutenções.

3.2 Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se uma breve contextualização do controle de tensão e da aplicação dos recursos de automação nas redes de distribuição, no intuito de otimizar os resultados obtidos em termos dos níveis de tensão, da operação dos equipamentos e conhecimento da rede de distribuição, pois permite a avaliação constante dos reguladores de tensão e demais equipamentos sem a preocupação com o deslocamento de equipes ou com a logística para a alteração de parâmetros de controle. Além disso, a integração dos recursos através do sistema de supervisão e a possibilidade de ação direta nos equipamentos permite a redução no número de reclamações geradas e o rápido tratamento de reclamações existentes reduzindo e evitando o pagamento de compensações.

4 METODOLOGIA PARA O CONTROLE HIERÁRQUICO E ADAPTATIVO DE TENSÃO

Nesse capítulo será apresentada a metodologia desenvolvida para o Controle Hierárquico e Adaptativo de Tensão (CHAT), responsável pela definição dos parâmetros dos de ajuste dos reguladores de tensão. O controle consiste de módulos individuais acoplados diretamente ao regulador de tensão que realizam as funções adaptativas, uma vez que realizam automaticamente uma nova parametrização sempre que são identificadas alterações no perfil de carga e tensão de sua zona de regulação. A parcela hierárquica desenvolvida é representada pelo controle centralizado, associado ao sistema SCADA, e que identifica, a partir da topologia da rede, a hierarquia de controle de tensão, estabelecendo a temporização adequada aos equipamentos conforme sua ordem de operação. O capítulo encontra-se dividido em seções principais, sendo na primeira encontrada a visão geral do controle, na segunda o detalhamento do controle individual, contemplando as funções de auto ajuste e, na última seção, a apresentação do controle centralizado, com as funções hierárquicas e o controle em tempo real.

4.1 CHAT – Controle Hierárquico e Adaptativo de Tensão

A metodologia CHAT é composta por duas áreas de ação: uma centralizada e outra distribuída. No bloco de controle distribuído encontram-se os controles individuais dos RT desenvolvidos nesta tese. O controle distribuído pode constituir-se em um equipamento adicional a ser acoplado aos RT em operação, ou, a partir do desenvolvimento de novos controles, constituir-se de um software embarcado nos novos relés. Independentemente do tipo, este controle individual (CI) será responsável pela definição dos parâmetros de ajuste de cada um dos reguladores. No controle centralizado, residem as funções para a definição da hierarquia dos equipamentos de cada alimentador em nível de sistema, estabelecendo os ajustes de temporização adequados para cada condição, além de realizar o comando em tempo real dos reguladores, enviando restrições de TAP ou tempo aos reguladores frente a determinadas condições observadas na rede. Uma visão geral do CHAT, com os módulos distribuídos e o controle centralizado é apresentada na Figura 4.1.

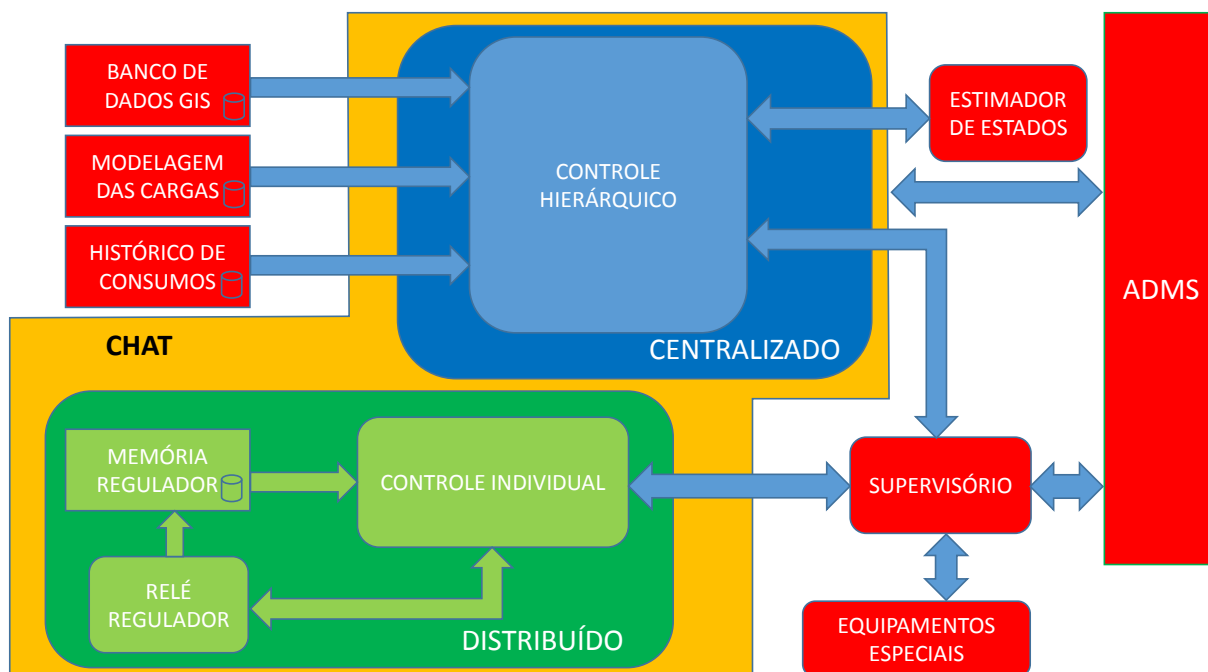


Figura 4.1 - Visão geral do CHAT

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em um primeiro momento, os controles operam de forma independente, porém complementares, uma vez que o controle individual estabelece os ajustes de cada RT e o controle centralizado define a temporização. Os módulos distribuídos, destinados ao controle individual, estabelecem os ajustes dos equipamentos com base na curva de carga e de tensão armazenada na memória dos reguladores. Assim, o módulo CI foi desenvolvido para minimizar a necessidade da realização de diversos estudos, medições e análises. Consiste da aplicação, em cada regulador de tensão, de uma unidade que permite a definição automática dos ajustes de cada equipamento, para qualquer das condições citadas. Um diagrama simplificado do controle individual, e seu vínculo com o controle centralizado, é apresentado na Figura 4.2.

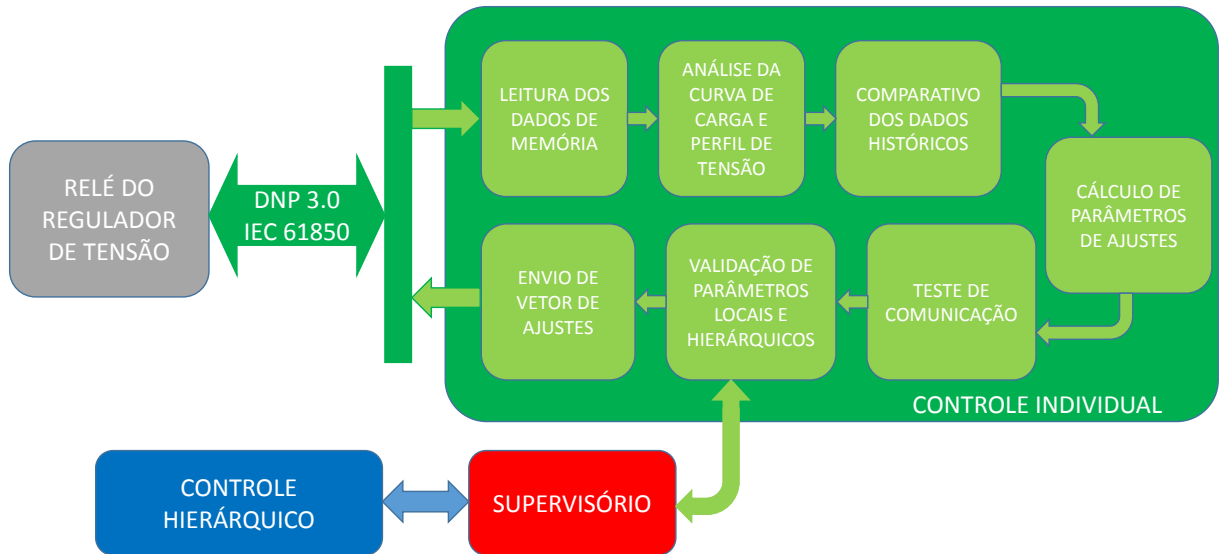


Figura 4.2 - Controle Individual – Visão Geral

Fonte: Elaborado pelo autor.

O controle centralizado, por sua vez, atua principalmente na transição entre os patamares de carga, ou seja, em variações significativas de tensão ou carga que indicam necessidade de elevar ou reduzir a tensão nos reguladores. Por exemplo, variações causadas pela retirada de um grande bloco de cargas no horário de ponta, ou o acréscimo de um trecho de outro alimentador devido a execução de uma manobra ou reconfiguração do sistema. Assim a hierarquia de controle do alimentador é verificada de forma centralizada, através da associação dos módulos distribuídos nos controladores e dos algoritmos presentes no módulo centralizado, o qual o qual torna-se parte integrante do sistema avançado de gerenciamento da distribuição (ADMS). A sequência de operação é realizada com base nessa hierarquia, a qual é definida utilizando-se de uma matriz hierárquica (M_H), construída a partir da topologia da rede de distribuição. Na Figura 4.3 é apresentada uma visão geral do controle hierárquico e sua ligação com os controles individuais.

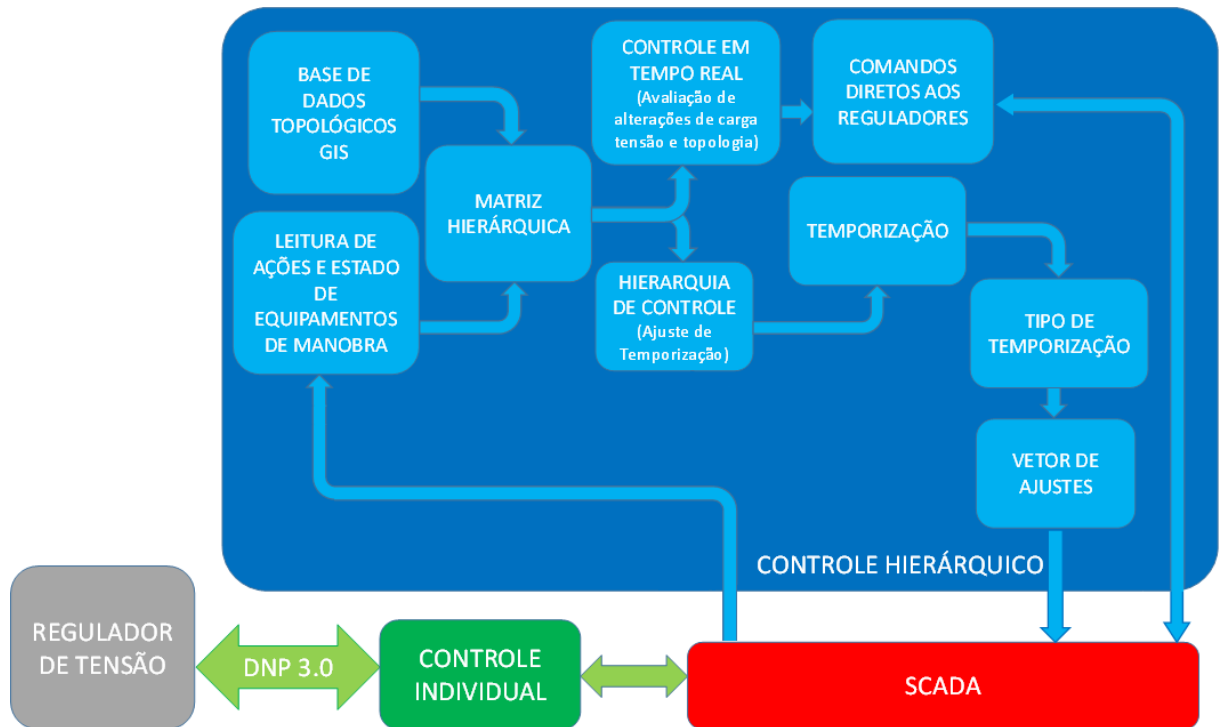


Figura 4.3 - Controle Hierárquico – Visão Geral

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta seção apresenta a metodologia desenvolvida para o controle individual dos reguladores de tensão. O controle desenvolvido baseia-se em ações individuais, por equipamento, que definem as zonas de regulação da tensão.

Ao se considerar os ajustes para um alimentador com um único regulador de tensão, ou sem reguladores de tensão em cascata, a temporização e a faixa de insensibilidade são definidas facilmente, uma vez que não há interação entre os equipamentos. No entanto, à medida que são adicionados reguladores ao longo da rede de distribuição, os ajustes devem ser realizados de forma coordenada, considerando faixas de tempo entre os equipamentos evitando assim, operações desnecessárias.

Os níveis de tensão de referência, compensação da queda de tensão na linha e a faixa de insensibilidade representam os ajustes básicos dos equipamentos e são estabelecidos com base na tensão no ponto de instalação do regulador e nos níveis de carregamento do mesmo, podendo ser definidos com base nas medições locais. Porém, de acordo com as variações sazonais da carga, durante a realização de manobras, sendo estas programadas ou não, para manutenção, para transferência de carga ou ainda, para reconfiguração de alimentadores, podem ser

necessários novos ajustes para os equipamentos. Esses novos ajustes podem ter duração de algumas horas ou permanecer por vários meses.

A atuação do controle local está baseada no acesso direto à memória dos reguladores de tensão, através de um hardware dedicado, realizando o processamento dos dados de carregamento, tensão no lado fonte, tensão no lado carga, posição de TAP e ajustes. A partir do processamento periódico destas informações, torna-se possível estabelecer o melhor conjunto de ajustes para o equipamento em qualquer condição de operação.

Utilizando-se da porta de comunicação do regulador, o CI acessa os registros de tensão de entrada e saída, carregamento (P, Q e I) e posição de TAP utilizando o protocolo de comunicação presente nos reguladores, em sua maioria o DNP 3.0 (TOSHIBA, 2006), (COOPER, 2004), (TAPELETRO, 2012) e (ITB, 20011). A partir de então, é gerada a curva de carga e de tensão para o regulador verificando as condições de regulação do equipamento. Uma vez calculados os ajustes, estes são enviados para o regulador de tensão que passa a considerá-los na sua operação.

Os valores das curvas de carga armazenados nos reguladores são constantemente monitorados e comparados com a curva utilizada para o cálculo dos ajustes. Assim, quando os níveis de carga ou tensão se afastam da curva de referência, considera-se um novo cenário indicando a necessidade de adequação dos ajustes. Uma vez identificada essa necessidade, são recalculados os parâmetros de tensão de referência (U_{REF}), compensação de queda de tensão na linha (U_R e U_X) e insensibilidade (Ins). Um método heurístico é responsável pela definição de U_{REF} , U_R e U_X , enquanto um controlador *Fuzzy* é utilizado para o cálculo de Ins.

Para garantir que não haverá violações dos níveis de tensão é realizado um novo ajuste dos valores de U_{REF} , adequando-o à faixa de insensibilidade.

4.2 Controle Individual – Processamento Distribuído do Controle de Tensão

Esta seção apresenta a metodologia desenvolvida para o controle individual dos reguladores de tensão. O controle desenvolvido baseia-se em ações individuais, por equipamento, que definem as zonas de regulação da tensão. A estratégia de temporização é denominada hierárquica uma vez que leva em conta a influência mútua existente entre os reguladores do sistema ou alimentador em questão. Este metodologia faz parte do controle hierárquico adaptativo de tensão (CHAT) desenvolvido na tese.

A parcela adaptativa de cada regulador de tensão baseia-se na definição dos ajustes dos equipamentos, considerando a os parâmetros de tensão de referência (U_{REF}), compensação de queda de tensão na linha (U_R e U_X), faixa de insensibilidade (Ins) e temporização ($t1$), associada a intervenção em tempo real na operação dos reguladores através de um controle centralizado. O monitoramento e controle dos equipamentos especiais, como reguladores de tensão, religadores e chaves com operação remota, através do sistema supervisor, além dos dispositivos específicos para o controle de tensão, atuam como gatilho para ativar a operação do controle centralizado.

As funções de auto ajuste são executadas em nível local, utilizando a memória dos próprios reguladores de tensão, que coletam informações referentes a cada zona de regulação. Essa condição tem como objetivo utilizar a capacidade de processamento dos reguladores e reduzir o esforço computacional do sistema centralizado, uma vez que em um ambiente inteligente, além do controle de tensão, outras funções de gerenciamento estão sendo executadas em tempo real e um grande volume de dados está em constante processamento. As zonas de regulação, como pode ser visto na Figura 4.4, são as áreas influenciadas pelos reguladores de tensão. Inicialmente pode-se considerar a zona de regulação como a área entre dois reguladores, porém a influência vai além, pois a variação de tensão causada por um regulador localizado a montante, por exemplo o regulador R1, resulta em alteração na tensão das demais zonas.

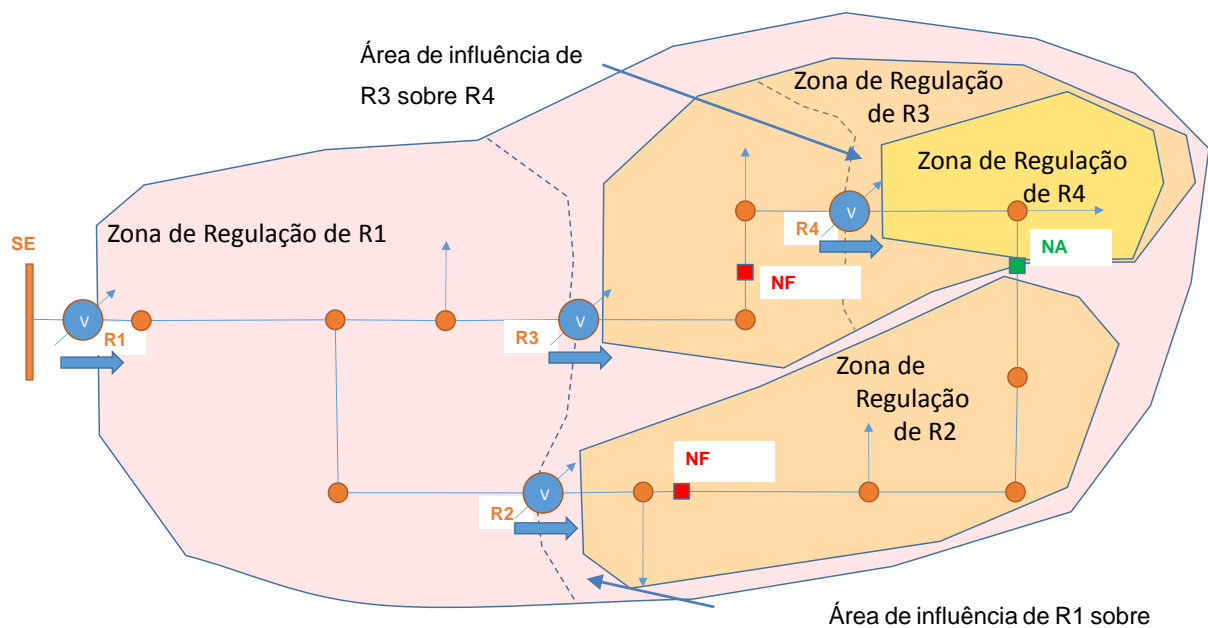


Figura 4.4 – Zonas de regulação de tensão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas variações podem gerar a necessidade de operação dos outros reguladores, ou evitar que comutações sejam realizadas, indicando, como será visto no capítulo seguinte, a importância da coordenação na operação dos reguladores.

A Figura 4.5 apresenta um fluxograma com a sequência de execução das funções de controle.

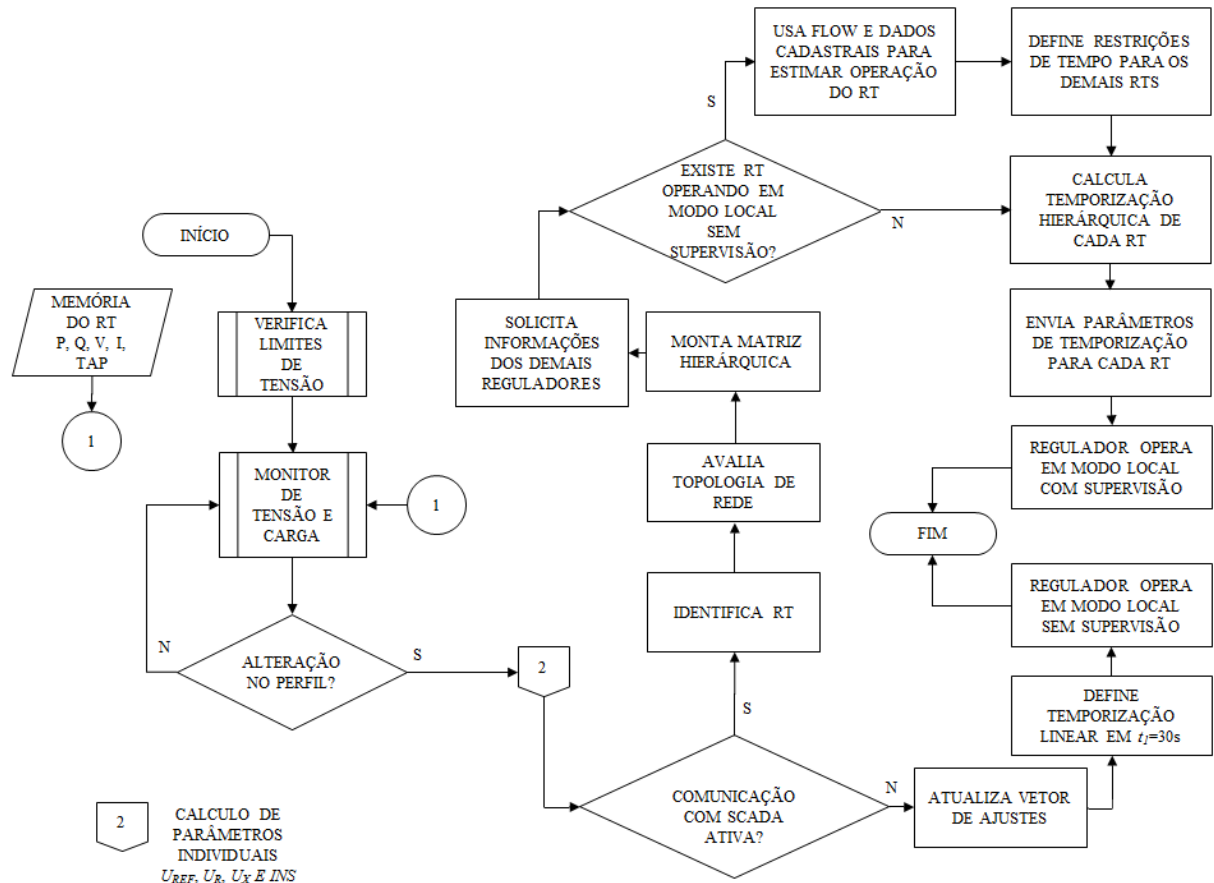


Figura 4.5 – Fluxograma do Controle Hierárquico e Adaptativo de Tensão

Fonte: Elaborado pelo autor.

A determinação dos parâmetros básicos do regulador de tensão ocorre a partir de um processo iterativo, que leva em consideração não somente o carregamento e valores desejados de tensão. Neste processo são considerados também os limites de tensão estabelecidos para que a tensão fornecida não viole os limites adequados, juntamente com a tensão no ponto de conexão do regulador de tensão. Esses limites são estabelecidos em conformidade com o zoneamento das posições de TAP a jusante de cada regulador. Ou seja, consideram como restrição a posição de TAP dos transformadores, avaliando os efeitos dos ajustes no lado secundário dos transformadores.

4.2.1 Heurística para a definição de U_{REF} , U_R e U_X

A determinação dos parâmetros básicos do regulador de tensão ocorre a partir de um processo iterativo, que leva em consideração não somente o carregamento e valores desejados de tensão. Neste processo são considerados também os limites de tensão estabelecidos para que a tensão fornecida não viole os limites adequados, juntamente com a tensão no ponto de conexão do regulador de tensão. Esses limites são estabelecidos em conformidade com o zoneamento das posições de TAP a jusante de cada regulador. Ou seja, consideram como restrição a posição de TAP dos transformadores, avaliando os efeitos dos ajustes no lado secundário dos transformadores.

Para o compensador de queda de tensão na linha, essa definição é tradicionalmente realizada com base na impedância do trecho de rede de distribuição cuja queda deverá ser compensada (TOSHIBA, 2006), (KERSTING, 2010) e (TAPELETRO, 2007), pois seu objetivo é garantir o nível de tensão adequado em um ponto distante da instalação do regulador de tensão, partindo do princípio que não existem consumidores entre o regulador e o ponto de tensão regulada. No entanto, dadas as atuais configurações das redes de distribuição, a premissa de que não existem consumidores próximos ao regulador de tensão não é válida em muitos alimentadores, de modo que devem ser impostos limites para a elevação de tensão obtida pelo compensador. Assim os valores dos parâmetros U_R e U_X não são definidos em função da impedância do trecho e sim de valores de tensão desejados em situações de carga máxima e mínima. Deste modo, o acesso a memória dos reguladores de tensão fornece as informações necessárias para a definição dos parâmetros de controle. Uma vez definido o ganho de tensão, calcula-se o valor da tensão de referência, considerando o limite máximo de tensão para a zona de TAP e o ganho obtido com o LDC.

O fluxograma apresentado na Figura 4.6, ilustra a operação do controle individual na definição dos valores dos parâmetros U_{REF} , U_R e U_X . A insensibilidade (*INS*) é definida através da aplicação de lógica *Fuzzy*, e será apresentada no próximo item.

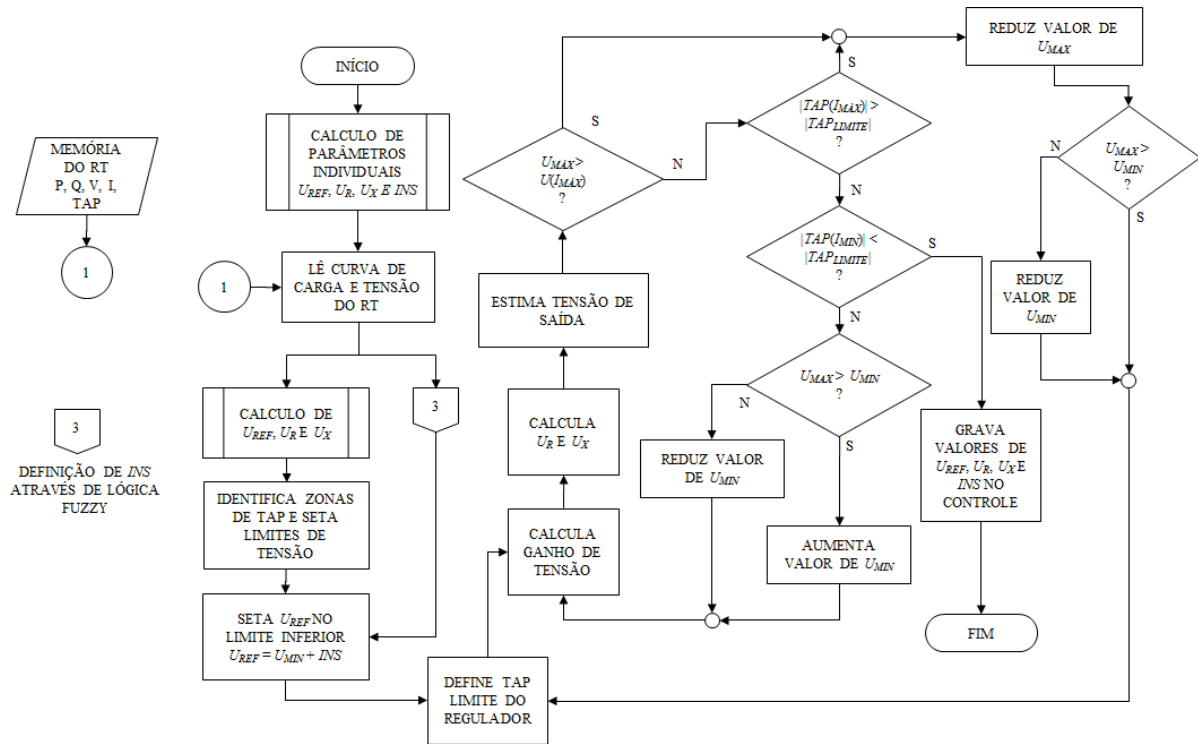


Figura 4.6 - Fluxograma de Ajuste do Controle Individual

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos valores lidos da memória do regulador, são calculados os ajustes de U_R , U_X , e U_{REF} , respectivamente por:

$$U_R = \left[\frac{(U_{PMax} - U_{PMin})}{RTP} \cdot \frac{RTC}{I_{PMax}} \right] \cdot \cos(\varphi_{PMax}) \quad (4.1)$$

$$U_X = \left[\frac{(U_{PMax} - U_{PMin})}{RTP} \cdot \frac{RTC}{I_{PMax}} \right] \cdot \sin(\varphi_{PMax}) \quad (4.2)$$

$$U_{REF} = \frac{U_{PMax} - \left[\frac{I_{PMax} \cdot (U_R \cdot \cos(\varphi) + U_X \cdot \sin(\varphi))}{I_C} \right]}{RTP} \quad (4.3)$$

Onde:

U_{REF} : Tensão de Referência [V]

U_R : compensação resistiva [Ω]

U_X : compensação reativa [Ω]

I_L : Corrente de Carga [A]

I_C : Corrente nominal do controle [A]

U_{PMax} : tensão desejada no patamar de carga máxima [V]

$U_{Saída}$: tensão desejada no patamar de carga leve [V]

I_{PMax} : corrente no patamar de carga máxima [A]

Os valores iniciais calculados são os parâmetros de compensação de queda de tensão na linha, responsáveis pelo ganho variável de tensão em função da corrente de carga. Os valores de U_R e U_X são definidos para o nível de carga máxima e após é calculado o valor de U_{REF} .

Uma vez definido o valor de U_R e U_X , é calculada a tensão de referência que mantenha a tensão adequada no patamar de carga leve e quando em carga pesada seja obtido o ganho do LDC compensando a queda de tensão no trecho. O efeito do compensador, pode ser analisado de duas formas. Na primeira, apresentada na Figura 4.7, verifica-se que o valor desejado de U_{REF} é obtido em um ponto distante do local de instalação do regulador de tensão e que a impedância do trecho é representada pelos parâmetros do compensador.

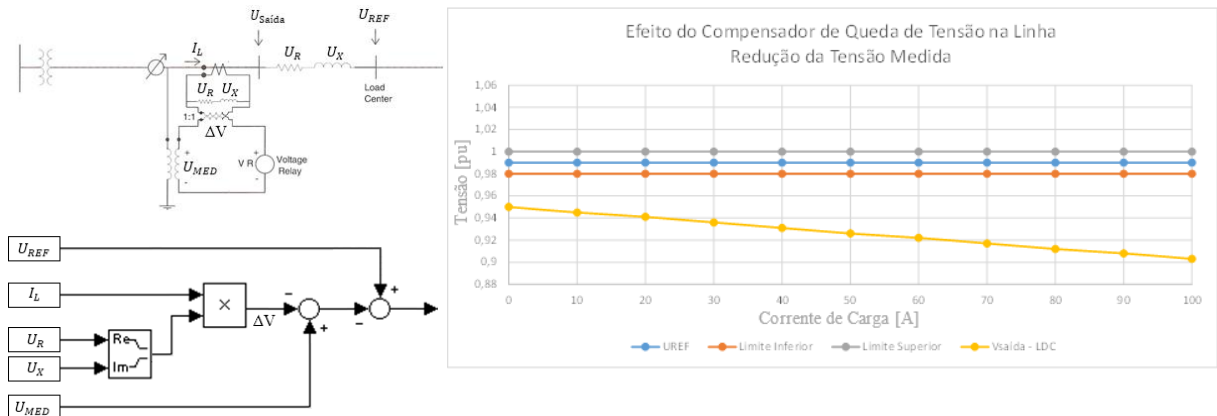


Figura 4.7 – Efeito do LDC como redutor da tensão de saída

Fonte: Elaborado pelo autor.

Desse modo o valor da queda de tensão estimada é subtraída da tensão medida nos terminais de saída do regulador indicando para o controle que a tensão é ainda menor.

Em uma segunda análise, pode-se considerar o efeito do LDC como um ajuste variável da tensão de referência, ou seja, o valor da queda de tensão estimada é somada ao valor de U_{REF} , deslocando o valor definido como meta para o regulador de um fator variável, dependente da corrente de carga, como pode ser visualizado na Figura 4.8.

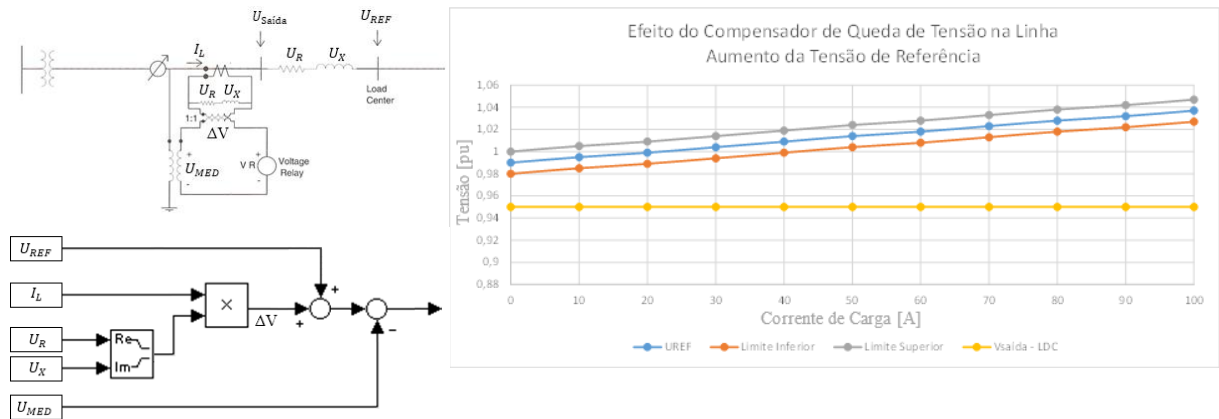


Figura 4.8 – Efeito do LDC como ajuste variável da tensão de referência

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta segunda abordagem, fica mais evidente o valor de tensão obtido na saída do regulador de tensão, de modo que os ajustes do compensador podem ser realizados considerando que os limites regulatórios não sejam ultrapassados em nenhum patamar de carga, ou seja, que o valor superior da faixa de insensibilidade, no instante de maior carregamento, esteja limitado ao valor regulatório.

Independente da interpretação realizada para o comportamento do LDC, os ajustes estabelecidos pelo controle individual são realizados de modo que não haja sobretensão para o equipamento operando dentro da faixa de carregamento. Quando ocorre alteração no perfil de carga os ajustes são recalculados e adequados à nova configuração.

4.2.2 Cálculo da Faixa de Insensibilidade

Para que o regulador encontre um ponto de operação e não execute comutações para pequenas variações de tensão é definida uma faixa de insensibilidade, ou zona morta dentro da qual o equipamento considera a tensão adequada. Para o cálculo da insensibilidade (*INS*), são utilizados os limites regulatórios e a análise da variação da tensão de entrada, propondo-se, para isso, o emprego da lógica *Fuzzy*, cuja estrutura é ilustrada pela Figura 4.9

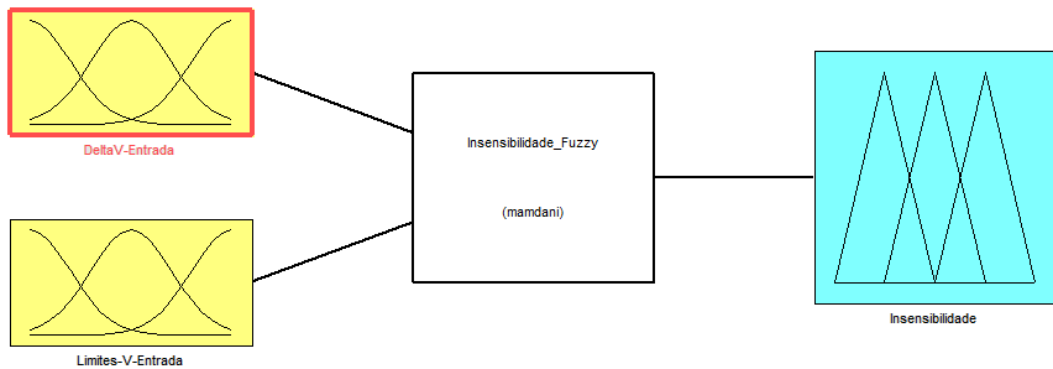


Figura 4.9 - Definição da Faixa de Insensibilidade – Controlador *Fuzzy*

Fonte: Elaborado pelo autor. Extraído do software MATLAB

Considera duas entradas distintas, sendo uma para a faixa de variação da tensão de entrada entre os patamares de carga leve e pesada, e outra considerando o comparativo da tensão com os limites regulatórios. Para cada variável de entrada foram utilizadas funções de pertinência trapezoidais, com faixas apresentadas na Figura 4.10.

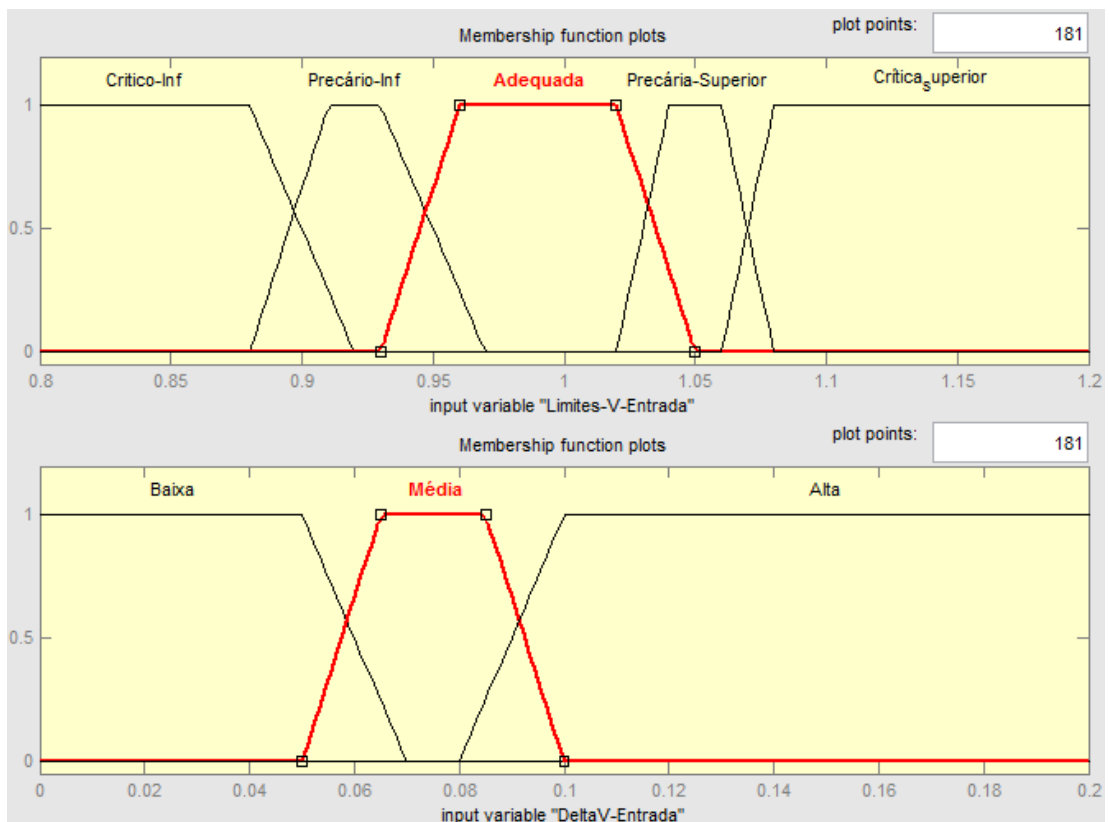


Figura 4.10 – Variáveis de Entrada do Controlador

Fonte: Elaborado pelo autor. Extraído do software MATLAB

Os parâmetros de cada conjunto, e os tipos de função representativos da Variação da Tensão de Entrada e dos Limites da Tensão de Entrada são apresentados respectivamente na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 – Funções e parâmetros *fuzzy* para a variável Variação da Tensão de Entrada

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	B
Baixa	Trapezoidal	0,000	0,000	0,050	0,070
Média	Trapezoidal	0,050	0,065	0,850	0,100
Alta	Trapezoidal	0,080	0,100	0,300	0,300

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.2 – Funções e parâmetros *fuzzy* para a variável Limites de Tensão

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	B
Crítico Inferior	Trapezoidal	0,70	0,70	0,88	0,92
Precário Inferior	Trapezoidal	0,88	0,91	0,93	0,97
Adequada	Trapezoidal	0,93	0,96	1,02	1,05
Precária Superior	Trapezoidal	1,02	1,04	1,06	1,08
Crítica Superior	Trapezoidal	1,06	1,08	1,30	1,30

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de insensibilidade variam conforme o equipamento, mas estão associados ao tamanho do degrau que cada TAP oferece, estando a insensibilidade baixa relacionada com $\pm 1\text{TAP}$, média dada por $\pm 2\text{TAP}$ e uma alta insensibilidade com valores na ordem de $\pm 4\text{TAP}$, como apresentado na

Tabela 4.3 Os limites de insensibilidade relacionados com o degrau de cada TAP permitem a adaptação do método tanto para reguladores de tensão de distribuição como para os CDCs das subestações, ajustando a faixa de acordo com o equipamento utilizado. Assim, por exemplo um regulador de distribuição de 32 degraus, com 10% de faixa de regulação, poderia sua insensibilidade ajustada para algum valor na faixa de $\pm 0,625\%$ a $\pm 2,5\%$.

Tabela 4.3 – Funções e parâmetros *fuzzy* para a variável Insensibilidade

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	B
Baixa	Trapezoidal	0	0	1,5	2,1
Média	Trapezoidal	1,5	2,1	2,9	3,5
Alta	Trapezoidal	2,9	3,5	5,00	5,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores foram escolhidos de modo a proporcionar uma faixa de regulação adequada, sem causar comutações excessivas devido a uma faixa muito estreita que torne o equipamento muito sensível a pequenas variações, nem lento demais devido a uma faixa muito larga, como pode ser visualizado na Figura 4.11.

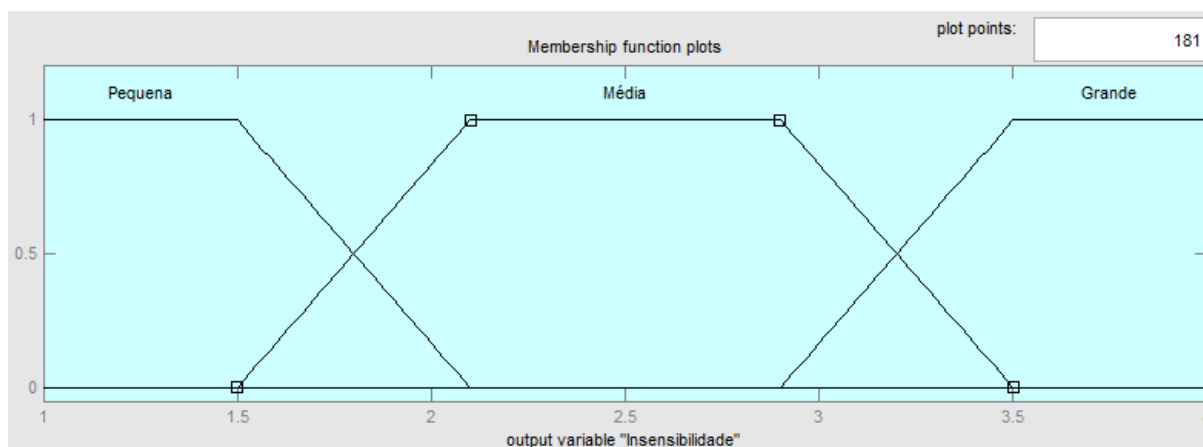


Figura 4.11 – Funções de Pertinência – Insensibilidade

Fonte: Elaborado pelo autor. Extraído do software MATLAB

O resultado da variável de saída é obtido pela aplicação de um conjunto de regras que relacionam as variáveis de entrada, apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Regras para definição da insensibilidade utilizadas no controlador *fuzzy*

Variáveis de Entrada		Saída
Variação da Tensão de Entrada	Limites de Tensão	Insensibilidade
Baixa	Precário Inferior	Média
Baixa	Adequado	Grande
Baixa	Precário Superior	Média
Média	Precário Inferior	Pequena

(continua)

Variáveis de Entrada		Saída
Variação da Tensão de Entrada	Limites de Tensão	Insensibilidade
Média	Adequado	Média
Média	Precário Superior	Média
Alta	Precário Inferior	Média
Alta	Adequado	Média
Alta	Precário Superior	Média
-	Crítica Superior	Pequena

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez alterados os parâmetros de ajuste, o equipamento envia ao controle centralizado, através do módulo CI, a configuração estabelecida para validação da hierarquia. Neste momento o processamento é realizado, retornando o conjunto de parâmetros para os reguladores de tensão contendo a a temporização indicada para a coordenação entre os equipamento. O valor e o tipo da temporização são definidos somente pelo controle centralizado, por conhecer a hierarquia de operação dos controladores e ao longo da rede de distribuição.

A grande vantagem da aplicação do controle individual, reside no fato de possibilitar o processamento distribuído dos parâmetros de controle, atuando como um sistema multi-agentes, uma vez que cada regulador define seus próprios ajustes. Outro ponto importante a considerar é que mesmo em uma condição de falta de comunicação com o sistema centralizado, os ajustes a nível local continuam a ser processados, definidos e enviados para os reguladores, uma vez que a unidade de processamento local está acoplada diretamente ao controle do regulador.

4.3 Influência Entre Zonas de Regulação

Em um alimentador de distribuição com vários reguladores, cada equipamento possui um módulo de controle individual (CI). Na Figura 4.12, pode ser visto que cada regulador de tensão atua em sua zona de regulação específica, podendo causar influência nas demais zonas, e que cada módulo CI acessa os dados de memória do regulador processando estes dados e estabelecendo o conjunto de ajustes do equipamento.

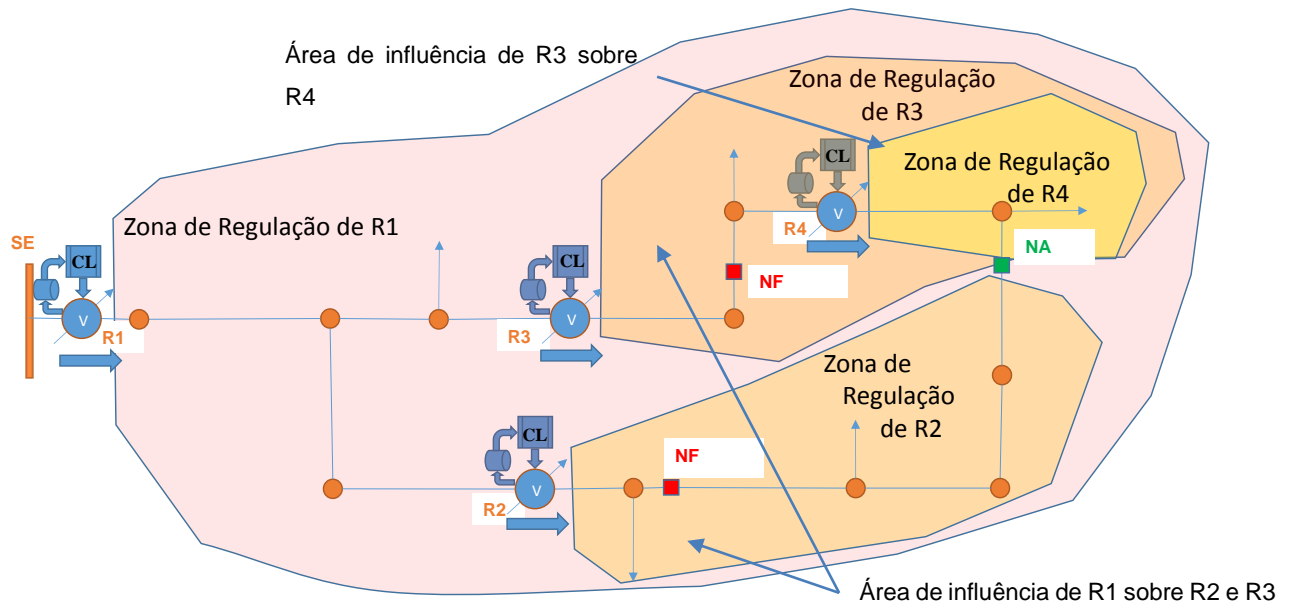


Figura 4.12 – Rede de distribuição com dispositivos CI distribuídos e zonas de regulação

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se pela sobreposição das zonas de regulação a influência exercida entre os reguladores. Pode-se constatar que a operação, em especial dos reguladores a montante, influencia diretamente os reguladores a jusante. Por exemplo, comutações de TAP realizadas pelo regulador R3 para adequação dos níveis de tensão podem se apresentar excessivas após a atuação do regulador R1, de modo que R3 tende a reduzir algumas posições de TAP.

Na Figura 4.13 verifica-se, em um primeiro momento, a operação do regulador de tensão elevando os níveis de tensão, e logo após, devido a ação dos equipamentos a montante, executando comutações para reduzir a tensão. A falta de coordenação sistêmica entre as temporizações resultou em um segundo bloco de tensões fora da faixa de ajuste do equipamento.

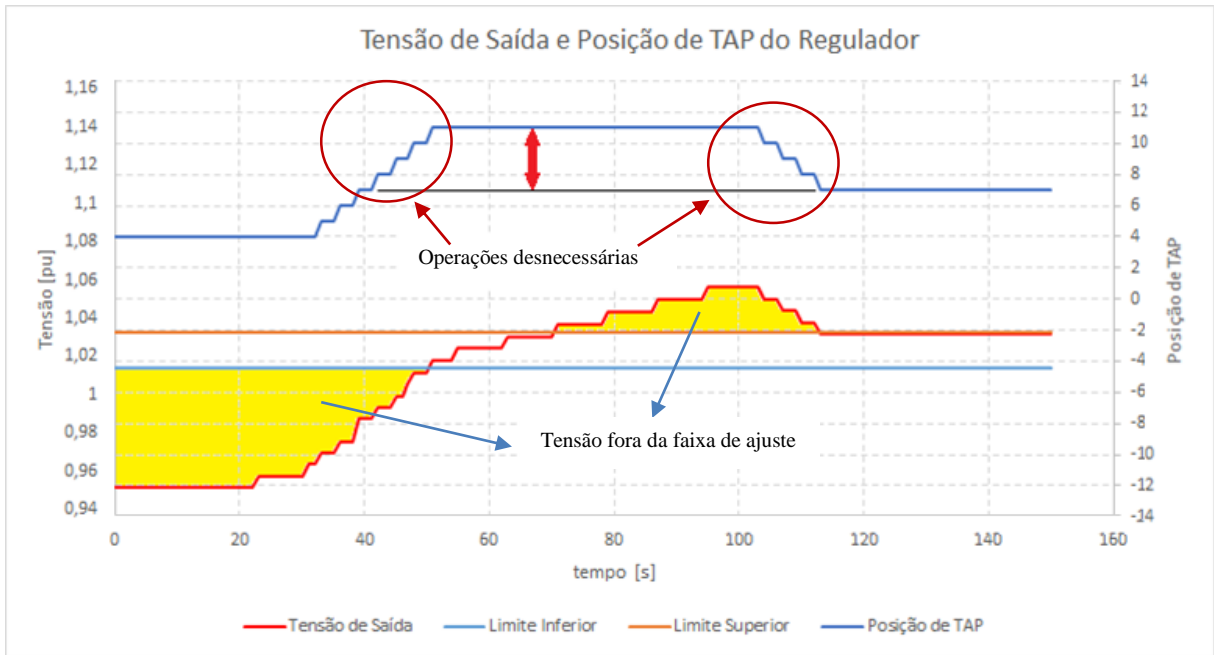


Figura 4.13 - Posição de TAP e Tensão de Saída de um regulador de tensão

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa segunda faixa de transgressão poderia ser evitada caso fosse limitada a posição máxima do regulador, como mostra a Figura 4.14.

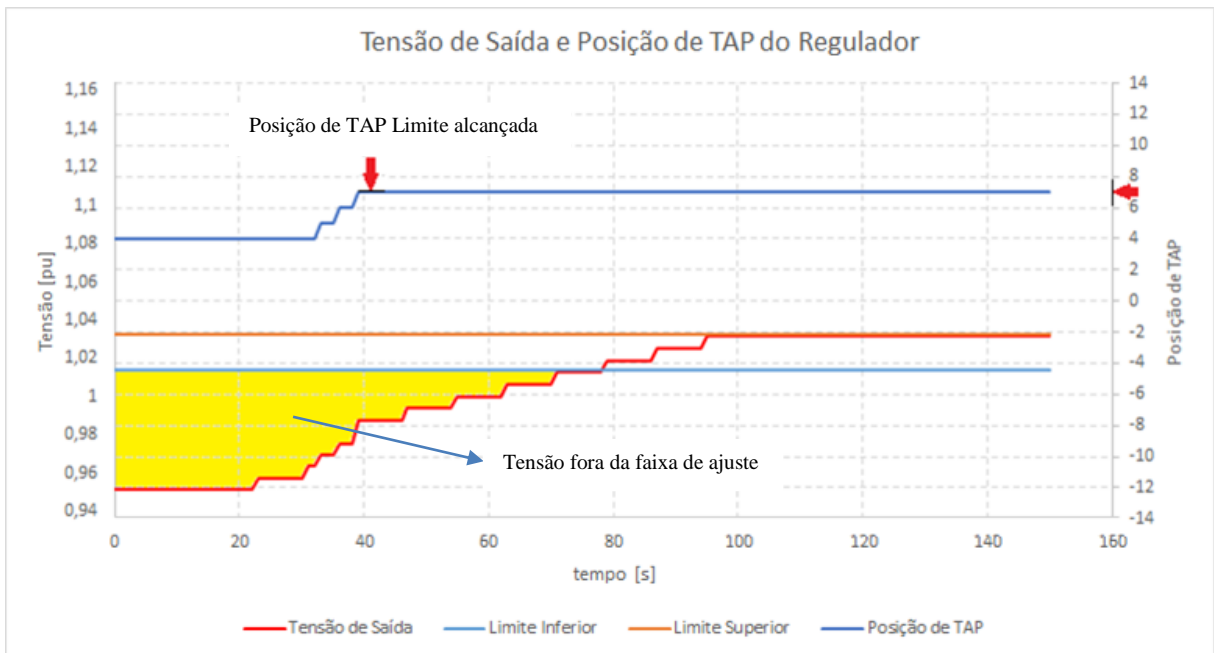


Figura 4.14 - Limitação da posição de TAP máximo do regulador

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, a área de transgressão poderia ser ainda mais reduzida caso, conforme apresentado na Figura 4.15, fosse antecipada a operação do regulador.

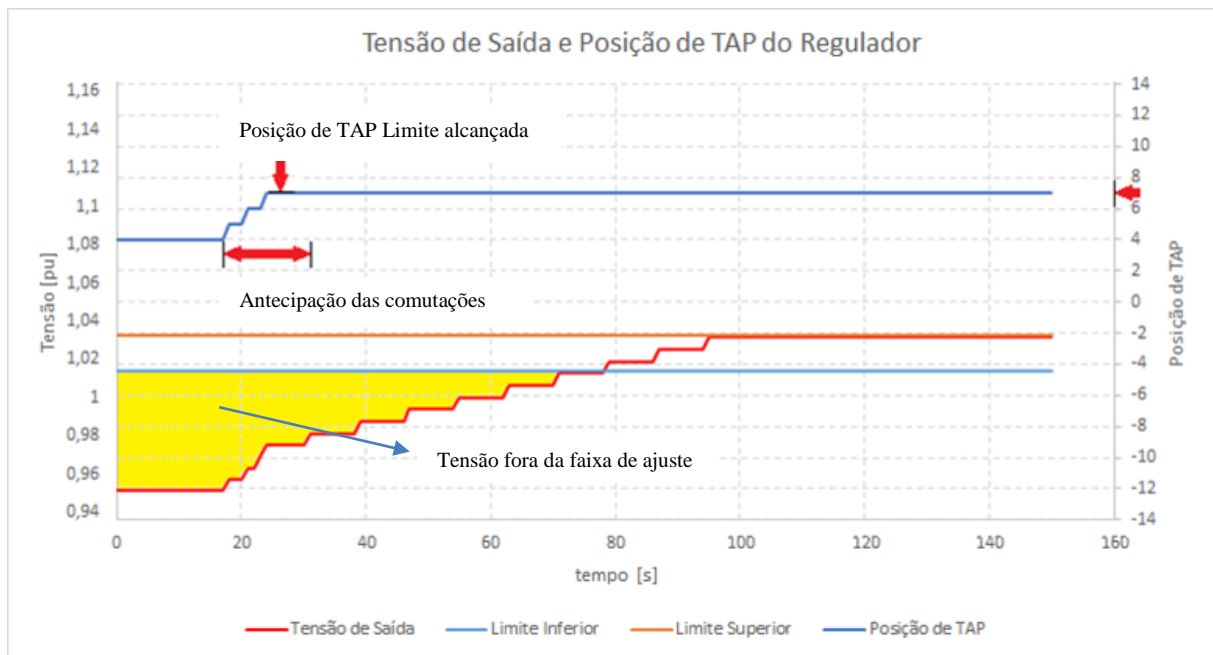


Figura 4.15 - Antecipação da Operação do Regulador

Fonte: Elaborado pelo autor

A integração das duas ações promove uma adequação mais efetiva com redução do número de comutações e a redução da área de transgressão da faixa de tensão definida para o regulador, como pode ser visto na Figura 4.16.

Com base nessa constatação, torna-se necessário avaliar o conjunto de controladores, juntamente com a variação de tensão que ocorre na rede, analisando qual ou quais equipamentos deverão atuar frente a uma determinada oscilação de tensão, ou ainda, se a operação pré-definida responde de maneira suficiente ou se será necessária uma intervenção de um controle centralizado comandando operações instantâneas em determinados equipamentos para acelerar a resposta.

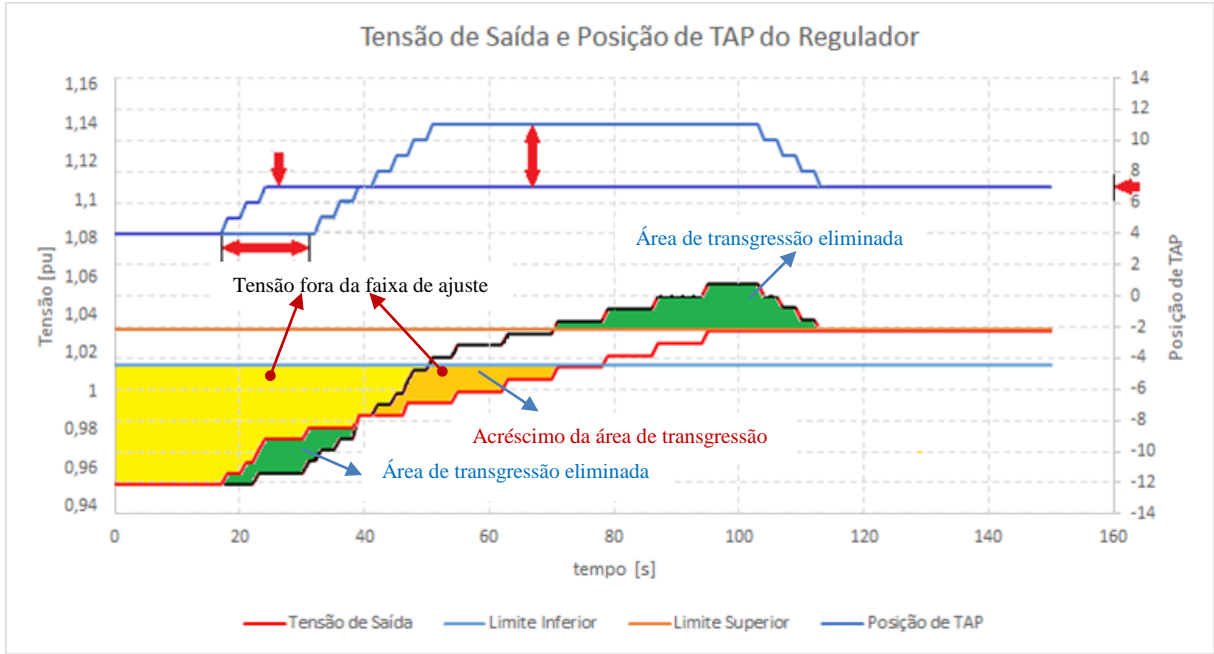


Figura 4.16 - Efeitos das ações de controle na redução das comutações e transgressão tensão

Fonte: Elaborado pelo autor.

Deste modo, foi criado um índice destinado a avaliar as violações da faixa de tensão de cada regulador. O chamado índice de severidade das transgressões de tensão (ISTT) é um indicador que contabiliza a duração e a amplitude das tensões fora da faixa ajustada para cada regulador de tensão, esse índice é calculado usando-se:

$$ISTT = \varepsilon_{sup} + \varepsilon_{inf} \quad (4.4)$$

Cujas parcelas representativas de transgressão superior e inferior são dadas respectivamente por:

$$\varepsilon_{sup} = \int_{t_0}^{t_0+t_{Reg}} \frac{[v(t) - \lambda_{sup}(t_0)] + |[v(t) - \lambda_{sup}(t_0)]|}{2} dt \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_{inf} = \int_{t_0}^{t_0+t_{Reg}} \frac{[\lambda_{inf}(t_0) - v(t)] + |[\lambda_{inf}(t_0) - v(t)]|}{2} dt \quad (4.6)$$

Onde:

ε_{sup} : transgressão do limite superior [pu·s];

ε_{inf} : transgressão do limite inferior [pu·s];

λ_{inf} : limite inferior de tensão [pu];

λ_{sup} : limite superior de tensão [pu]

$v(t)$: tensão no instante t [V];

t_0 : tempo de início da transgressão de tensão [s];

t_{Reg} : tempo máximo estimado para a regularização das tensões [s].

O ISTT calcula a área de violação de tensão para cada perturbação percebida e é utilizado para avaliar os ganhos obtidos com a aplicação das metodologias desenvolvidas nesta tese.

Assim foi desenvolvida uma estratégia de coordenação dos equipamentos, realizada através da definição das temporizações, considerando a topologia da rede de distribuição e a ordem de atuação dos RT. Além disso, este módulo deve antecipar a ação dos reguladores e limitar as posições de TAP para uma dada variação de tensão ou carga, permitindo reduzir o número de operações e a área de tensão inadequada.

4.4 Controle Hierárquico – Módulo Centralizado

Uma vez estabelecidos os parâmetros de ajustes de cada regulador, pelos respectivos módulos de controle individual, é necessário coordenar a operação dos reguladores de tensão, estabelecendo de maneira hierárquica a temporização dos equipamentos considerando a hierarquia de posicionamento de cada RT no sistema. A estratégia de temporização é denominada hierárquica uma vez que leva em conta a influência mútua existente entre os reguladores do sistema ou alimentador em questão.

Uma matriz M_H é associada a cada alimentador, para quantificar a influência que cada regulador exerce sobre os demais. A matriz M_H , representa as correlações entre os equipamentos, em ordem numérica decrescente, de modo que seus elementos se expressam da seguinte forma:

$$a_{ij} = \begin{cases} f_{ij} \cdot (n - m) \quad \forall i < j \\ d_i \quad \forall i = j \\ f_{ij} \cdot \left[\frac{1}{(n - m)} \right] \quad \forall i > j \end{cases} \quad (4.7)$$

Onde:

a_{ij} : elemento da linha i e coluna j da matriz hierárquica;

n : número de reguladores do sistema em análise

m : número de reguladores entre os reguladores RT((i) e RT(j)

d : direção do fluxo de carga no regulador RT(i). 1 se fluxo direto e -1 se fluxo inverso.

f_{ij} : indicativo da influência do regulador RT(i) no regulador RT(j). 1 se RT(i) pertence ao caminho de RT(j) até a subestação ou 0 se não pertence.

A maior influência é exercida sobre o equipamento de primeira vizinhança, a jusante do equipamento em análise, sendo reduzida de uma unidade para a segunda vizinhança e assim por diante.

O efeito é inverso quando a avaliação é realizada para os equipamentos a montante e quando o regulador não é diretamente influenciado, isto é, que não pertence ao mesmo caminho elétrico, recebe o valor zero. A ordem da matriz varia de acordo com a quantidade de dispositivos de controle presentes no alimentador ou no sistema em análise. Na diagonal principal está indicado o sentido do fluxo no ramo de instalação do regulador de tensão. Esta consideração é utilizada para identificar qual o nível de tensão que deverá ser mantido em cada regulador, sendo necessária para a definição do conjunto de ajustes.

O algoritmo acessa a base cadastral e realiza uma varredura da rede, partindo de cada equipamento até a subestação, verificando a existência de reguladores a montante do equipamento em análise. Os elementos da primeira vizinhança apresentam uma maior influência, sendo esta reduzida à medida que existem equipamento intermediários.

A fim de exemplificar a construção da matriz hierárquica, considerem-se 3 reguladores de tensão localizados em uma rede de distribuição e a presença de regulador na subestação, conforme esquematizado na Figura 4.17, totalizando 4 equipamentos de controle de tensão.

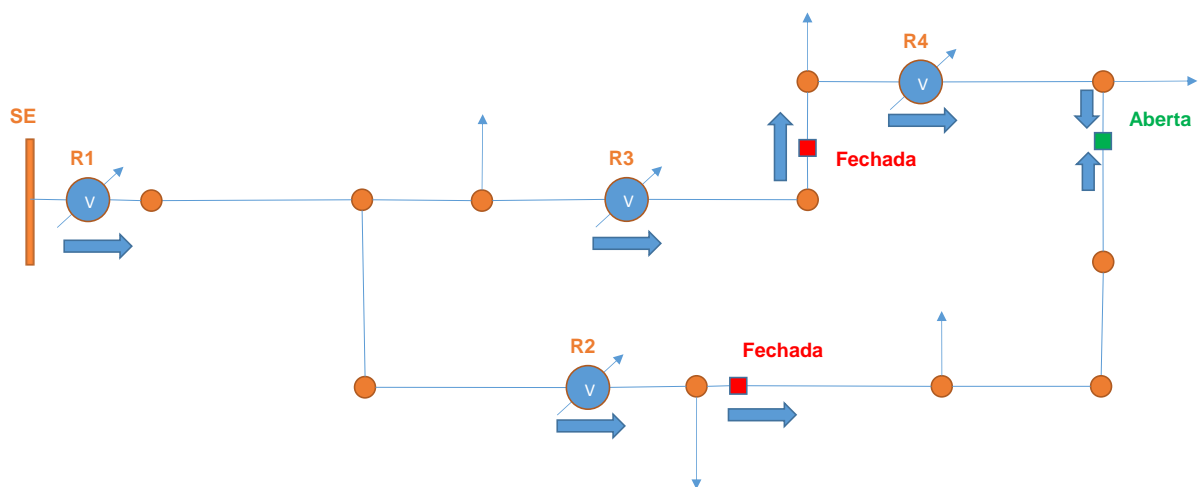


Figura 4.17 - Rede com reguladores – configuração original

Fonte: Elaborado pelo autor.

O regulador R1 representa o controle de tensão da subestação, não havendo equipamento a montante. Avaliando a sua influência sobre os demais, verifica-se que o regulador R2 é o equipamento de primeira vizinhança. Assim, com base na Equação (4.7) verifica-se que a influência de R1 sobre R2 é máxima pois não existem equipamentos entre R1 e R2, sendo $m=0$. O número de equipamentos no sistema é $n=4$, e como R1 está presente no caminho de R1 até a SE, $f=1$, logo: $a_{12} = 4$. O mesmo ocorre com a relação de R1 sobre R3. No entanto , a avaliação de R1 sobre R4, verifica-se a existência do regulador R3 entre os equipamentos, assim, $m=1$. Desse modo, $f_{14}=1$, e $a_{14} = 3$.

Passando para a linha seguinte, onde é avaliada a influência do regulador R2 sobre os demais, verifica-se que, como R2 é influenciado por R1, $a_{21} = 0,25$. Como R3 e R4 não pertencem ao caminho de R2 até a subestação, os valores de f_{23} e f_{24} são iguais a 0, logo $a_{23} = 0$ e $a_{24} = 0$. Estando R2 operando em fluxo direto, $a_{22} = 1$. Assim, a construção da matriz hierárquica do alimentador terá seus valores calculados do seguinte modo.

$$M_H = \begin{bmatrix} d_1 & f_{12} \cdot (n - m_2) & f_{12} \cdot (n - m_3) & f_{12} \cdot (n - m_4) \\ f_{12} \cdot \frac{1}{(n - m_2)} & d_2 & f_{12} \cdot (n - m_3) & f_{12} \cdot (n - m_3) \\ f_{12} \cdot \frac{1}{(n - m_2)} & f_{12} \cdot \frac{1}{(n - m_2)} & d_3 & f_{12} \cdot (n - m_3) \\ f_{12} \cdot \frac{1}{(n - m_2)} & f_{12} \cdot \frac{1}{(n - m_2)} & f_{12} \cdot \frac{1}{(n - m_2)} & d_4 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Substituindo-se os valores, tem-se:

$$M_H = \begin{bmatrix} 1 & 1 \cdot (4 - 0) & 1 \cdot (4 - 0) & 1 \cdot (4 - 1) \\ 1 \cdot \frac{1}{(4 - 0)} & 1 & 0 \cdot (4 - 0) & 0 \cdot (4 - 0) \\ 1 \cdot \frac{1}{(4 - 0)} & 0 \cdot \frac{1}{(4 - 0)} & 1 & 1 \cdot (4 - 0) \\ 1 \cdot \frac{1}{(4 - 1)} & 0 \cdot \frac{1}{(4 - 0)} & 1 \cdot \frac{1}{(4 - 0)} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Após a varredura de todos os equipamentos e da atribuição dos valores de influência mutua, a matriz apresenta o seguinte resultado:

$$M_H = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 4 & 3 \\ \frac{1}{4} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{4} & 0 & 1 & 4 \\ \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{4} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Estabelecida a matriz, a partir da análise de cada linha, é possível identificar a ordem de atuação dos reguladores e a existência de influências entre as operações realizadas em cada regulador em relação aos demais. Tomando-se como exemplo a matriz apresentada em (4.16), a primeira linha representa o regulador R1, a segunda R2, a terceira R3 e a quarta R4. As colunas, apresentam os reguladores nessa mesma ordem. Desse modo, através do cruzamento entre linha e coluna, verifica-se a influência que o regulador da linha exerce sobre o regulador da coluna. Assim, pela análise da primeira linha, a matriz fornece a informação de que o R1 encontra-se a montante de R2 e R3, e que R4 encontra-se a jusante de R2 ou R3. Para identificar a correta posição de R4 é necessário recorrer às demais linhas da matriz. Nota-se que ao avaliar a linha 2, que a coluna 4, referente ao regulador R4, possui valor 0, indicando que R2 e R4 não possuem qualquer relação. Logo, ao verificar a linha 3 identifica-se o valor 4 na coluna correspondente a R4, indicando que R3 está a montante de R4 e que exerce influência sobre este. A partir desta análise é possível reconstruir o diagrama da rede, posicionando corretamente os reguladores. Cada topologia de rede será representada por uma matriz hierárquica. Assim, conforme mostra a Figura 4.18, quando é realizada alguma manobra de reconfiguração, a topologia da rede é alterada. A manobra resultou na transferência de R4 para o ramo atendido por R2 e alterando o sentido de fluxo do regulador R4.

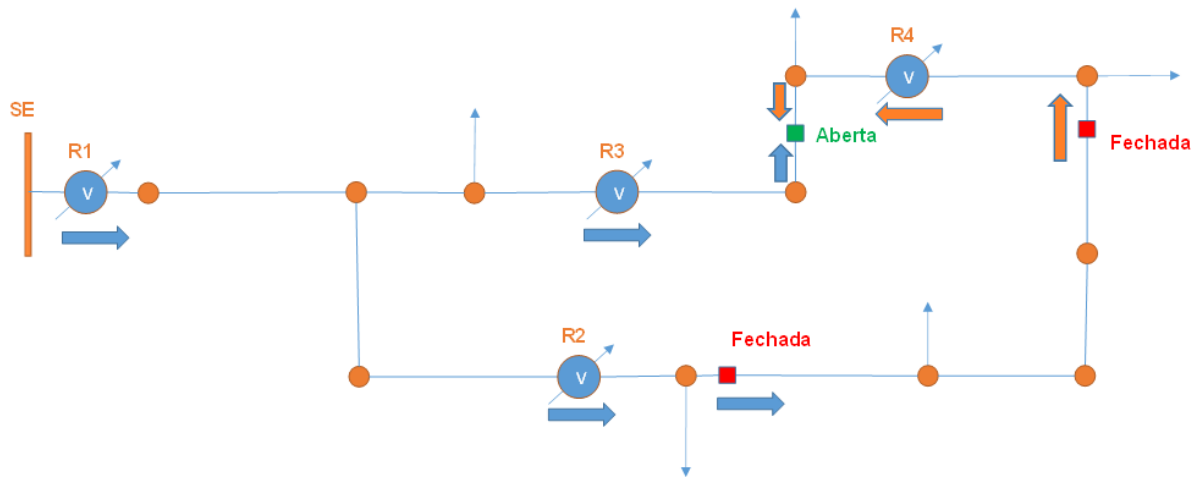


Figura 4.18 - Rede com reguladores – reconfigurada

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa alteração na topologia leva a geração de uma nova matriz hierárquica e ao recálculo dos parâmetros de controle de cada regulador, ficando M_H para a nova configuração com o seguinte formato:

$$M_H = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 4 & 3 \\ 1/4 & 1 & 0 & 4 \\ 1/4 & 0 & 1 & 0 \\ 1/3 & 1/4 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

De posse da insensibilidade e da matriz hierárquica, é possível calcular o tempo necessário para a regularização dos níveis de tensão para uma dada perturbação no sistema, seja utilizando a temporização linear (TL) ou a temporização inversa (TI). Pode-se também utilizar a temporização híbrida, com *delay* entre as comutações, já existente nos relés 90 utilizados para controle do CDC, em casos onde se pode aguardar um tempo maior, frente a pequenas variações de tensão. Assim, nota-se que tempo de regularização se altera dependendo do modo de operação e do tipo de temporização aplicada no regulador de tensão. Esses efeitos podem ser melhor interpretados pelo cálculo do tempo estimado para regularização dos níveis de tensão primária para cada regulador, caso não houvesse influência dos demais equipamentos.

No caso de operação em modo sequencial, existe apenas o efeito da temporização até a primeira comutação. Para as demais ocorre apenas o tempo de comutação. Assim o tempo de regularização estimado considerando aplicação de temporização linear será dado por:

$$t_{Reg} = t_1 + t_{Com} \cdot TAP \quad (4.12)$$

A utilização da temporização inversa no modo sequencial representa uma resposta mais rápida, cujo tempo estimado será:

$$t_{Reg} = TAP \cdot t_{Com} + (Ins \cdot t_1) \cdot \frac{1}{[U_{REF} + LDC(t_0)] - v(t_0)} \quad (4.13)$$

Aplicando o modo não sequencial, onde existe um *delay* entre as comutações o resultado se altera significativamente apresentando um tempo maior de regularização. Ao se utilizar a mesma temporização t_1 , tanto para a primeira comutação como entre as comutações adicionais, o resultado será:

$$t_{Reg} = TAP \cdot (t_1 + t_{Com}) \quad (4.14)$$

Através da aplicação de uma segunda temporização para as comutações subsequentes, o tempo estimado de regularização será calculado considerando:

$$t_{Reg} = t_1 + t_{Com} + (TAP - 1) \cdot (t_2 + t_{Com}) \quad (4.15)$$

Uma combinação entre o uso de operação não sequencial e a temporização inversa aplicada entre as comutações pode apresentar resultados positivos, inserindo uma temporização variável entre as comutações. A expressão dada por (4.16) permite aplicar essa sugestão tornando t_2 dependente da variação de tensão.

$$t_{Reg} = t_1 + TAP \cdot t_{Com} + (Ins \cdot t_2) \cdot \sum_{n=0}^{TAP} \frac{1}{[U_{REF} + LDC(t_0)] - [v(t_0) + n \cdot \Delta_{TAP}]} \quad (4.16)$$

Onde:

t_{Reg} : tempo de regularização da tensão [s];

t_1 : tempo de retardo [s];

t_2 : tempo de retardo [s];

t_{Com} : tempo de comutação [s];

n : número de comutações necessárias para adequar a tensão;

Ins : faixa de insensibilidade [pu];

$v(t_0)$: tensão medida no lado carga do regulador [pu] no instante t_0 [pu];

$LDC(t_0)$: ganho de tensão causado pela compensação de queda no instante t_0 [pu].

Os valores calculados e apresentados até então são classificados como valores estáticos que são definidos para uma dada perturbação no instante t_0 . Para possibilitar o cálculo do tempo de regularização, neste instante é necessário calcular o ganho de tensão e o número de TAPs utilizados para a regularização dos níveis de tensão, os quais são respectivamente calculados a partir de:

$$LDC(t_0) = \frac{I_L(t_0) \cdot [U_R \cdot \cos(\varphi) + U_X \cdot \sen(\varphi)]}{I_C} \quad (4.17)$$

$$TAP = int \left\{ \frac{[U_{REF} + LDC(t_0)] - v(t_0)}{\Delta_{TAP}} \right\} \quad (4.18)$$

Onde:

t_0 : instante de tempo em que ocorreu a transgressão;

Δ_{TAP} : variação de tensão unitária de cada TAP;

TAP: quantidade de TAPs estimada para regularizar os níveis de tensão.

O termo $LDC(t_0)$ corresponde ao ganho de tensão necessário devido a corrente de carga no instante t_0 para levar a tensão de saída aos valores estabelecidos para a zona de regulação. Assim, quando identificada uma dada variação de tensão é necessário considerar a corrente de cada regulador nesse instante de tempo. Além disso, é necessário conhecer a posição de TAP atual, da tensão de entrada e saída de cada regulador de tensão permitindo avaliar o número de comutações possíveis para a adequação da tensão. Esses valores são armazenados nos vetores de corrente (I_L), TAP atual (T_A), tensão de entrada (V_E) e tensão de saída (V_S), os quais são representados respectivamente por:

$$I_L = [I_{R1} \quad I_{R2} \quad I_{R3} \quad I_{R4}] \quad (4.19)$$

$$T_A = [T_{A_{R1}} \quad T_{A_{R2}} \quad T_{A_{R3}} \quad T_{A_{R4}}] \quad (4.20)$$

$$V_E = [V_{E_{R1}} \quad V_{E_{R2}} \quad V_{E_{R3}} \quad V_{E_{R4}}] \quad (4.21)$$

$$V_S = [V_{S_{R1}} \quad V_{S_{R2}} \quad V_{S_{R3}} \quad V_{S_{R4}}] \quad (4.22)$$

Com os valores de V_E e V_S é verificada a queda de tensão (ΔV) entre os reguladores, calculada por (4.23).

$$\Delta V_{m,n} = V_{S_m}^{t_0} - V_{E_n}^{t_0} \quad (4.23)$$

Sendo:

$\Delta V_{m,n}$: queda de tensão do regulador m até o regulador n ;

$V_{S_m}^{t_0}$: tensão de saída do regulador m no instante t_0 ;

$V_{E_n}^{t_0}$: tensão de saída do regulador m no instante t_0 .

Associando os valores de ΔV , V_E e V_S com os elementos de primeira vizinhança da matriz hierárquica é obtida a matriz de tensões M_V , cuja diagonal principal apresenta os valores de tensão de saída de cada regulador. Nos elementos abaixo da diagonal principal são alocados os valores de tensão de entrada, porém relacionando sua posição na matriz com o regulador a

montante e, por fim, aos elementos acima da diagonal principal são atribuídos os valores de queda de tensão do regulador a montante em relação ao elemento a jusante.

$$M_V(t_0) = \begin{bmatrix} VS_1 & \Delta V_{12} & \Delta V_{13} & \Delta V_{14} \\ VE_{21} & VS_2 & \Delta V_{23} & \Delta V_{24} \\ VE_{31} & VE_{32} & VS_3 & \Delta V_{34} \\ VE_{41} & VE_{42} & VE_{43} & VS_4 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Exemplificando a visualização das tensões, para a rede representada pela Equação (4.10), a matriz M_V fica:

$$M_V(t_0) = \begin{bmatrix} VS_1 & \Delta V_{12} & \Delta V_{13} & 0 \\ VE_{21} & VS_2 & 0 & 0 \\ VE_{31} & 0 & VS_3 & \Delta V_{34} \\ 0 & 0 & VE_{43} & VS_4 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Nessa matriz pode-se visualizar que a fonte representada por V_{S1} é responsável pela tensão de entrada nos reguladores R2 e R3 e que O regulador R3 atua diretamente na tensão de entrada de R4.

Identificados os tempos de regulação, associados com a matriz hierárquica, o controle centralizado pode identificar necessidade de interferência nos reguladores, fazendo-os atuarem de forma instantânea até uma determinada posição de TAP, agilizando a regularização e reduzindo o número de chaveamentos dos equipamentos.

No entanto, a definição do TAP limite de cada RT, depende da operação integrada dos equipamentos, uma vez que a operação de um dado equipamento influencia no nível de tensão dos demais. Assim, se faz necessária a análise da dinâmica dos reguladores, frente a uma dada perturbação, para que após isso seja possível identificar o tempo máximo de regularização e a posição de TAP de cada equipamento nesse tempo máximo para a regularização da tensão. O cálculo iterativo do instante t_0 até o máximo tempo de regularização, permite identificar a posição de TAP, T_E , de cada equipamento, calculada por:

$$TE_n^t = \begin{cases} TE_n^{(t-1)} + OP_r^t \cdot H(t - t_1 - t_{Com} - t_2) & \text{se } t \bmod(t_{Com} + t_2) = 0 \\ TE_n^{(t-1)} & \text{se } t \bmod(t_{Com} + t_2) > 0 \end{cases} \quad (4.26)$$

Com a posição de TAP estimada do regulador, pode-se calcular a tensão de saída do mesmo.

$$VS_n^t = VE_r^t \cdot (1 + TE_n^t \cdot \Delta_{TAP}) \quad (4.27)$$

Onde:

VE_n^t : tensão de entrada do regulador r no instante t [V];

TE_n^t : Posição de TAP estimada para o regulador n no instante t ;

$TE_n^{(t-1)}$: Posição de TAP estimada para o regulador n no instante anterior;

OP_r^t : Operação do regulador de tensão r no instante t .

O modo de operação OP_r^t do regulador de tensão define a necessidade de elevar ou abaixar posições de TAP, sendo um multiplicador da função degrau, de acordo com o valor da tensão de saída do regulador r no instante t , tendo a seguinte expressão:

$$OP_n^t = \frac{(\lambda i_n^{t_0} - VS_n^{(t-1)}) + |(\lambda i_n^{t_0} - VS_n^{(t-1)})|}{2 \cdot |(\lambda i_n^{t_0} - VS_n^{(t-1)})|} + \frac{(VS_n^{(t-1)} - \lambda s_n^{t_0}) + |(VS_n^{(t-1)} - \lambda s_n^{t_0})|}{2 \cdot |(\lambda s_n^{t_0} - VS_n^{(t-1)})|} \quad (4.28)$$

Onde:

$VS_n^{(t-1)}$: tensão de saída estimada no regulador n no instante anterior [V];

$\lambda i_n^{t_0}$: valor limite inferior de tensão do regulador n no instante t_0 ;

$\lambda s_n^{t_0}$: valor limite superior de tensão do regulador n no instante t_0 .

O resultado de OP_n^t será positivo quando houver necessidade de elevar posições de TAP ou negativo quando necessário diminuir posições. Permanecerá com valor zero sempre que a tensão estiver na faixa adequada, ou seja:

$$OP_n^t = \begin{cases} -1 & \text{se } VS_n^{(t-1)} > \lim_s_n^{t_0} \\ 0 & \text{se } \lim_i_n^{t_0} \leq VS_n^{(t-1)} \leq \lim_s_n^{t_0} \\ 1 & \text{se } VS_n^{(t-1)} < \lim_i_n^{t_0} \end{cases} \quad (4.29)$$

Assim, com os valores de queda de tensão obtidos no instante t_0 , a matriz de tensão passa a ter um comportamento dinâmico, tendo seus valores de VE e VS modificados com a

variação do tempo. A tensão de entrada é calculada utilizando a tensão de saída do regulador m imediatamente a montante de n descontada da queda de tensão entre m e n , ou seja:

$$VE_n^t = VS_m^t - \Delta V_{m,n}^{t_0} \quad (4.30)$$

Onde:

$\Delta V_{m,n}^{t_0}$: queda de tensão entre o regulador m e o regulador n instante t_0

Deste modo a matriz de tensões dinâmica tem seus valores atualizados de acordo o tempo e posição de TAP estimado para cada regulador:

$$MV(t) = \begin{bmatrix} VS_1^t & \Delta V_{12}^{t_0} & \Delta V_{13}^{t_0} & \Delta V_{14}^{t_0} \\ VE_{21}^t & VS_2^t & \Delta V_{23}^{t_0} & \Delta V_{24}^{t_0} \\ VE_{31}^t & VE_{32}^t & VS_3^t & \Delta V_{34}^{t_0} \\ VE_{41}^t & VE_{42}^t & VE_{43}^t & VS_4^t \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Simulado todo o tempo de regularização, a posição de TAP indicada nesse instante para cada RT é então utilizada como posição limite do equipamento, sendo enviada juntamente com o tempo t_l aos reguladores através do sistema SCADA, através dos vetores de t_{OP} e TAP_{lim} , dados por:

$$t_{OP} = [t_{R1} \quad t_{R2} \quad t_{R3} \quad t_{R4}] \quad (4.32)$$

$$TAP_{lim} = [TAP_{R1} \quad TAP_{R2} \quad TAP_{R3} \quad TAP_{R4}] \quad (4.33)$$

Transcorrido o tempo t_l a comutação dos equipamentos é iniciada simultaneamente, até alcançar essa posição definida. Respeitando essa posição limite, a operação simultânea dos equipamentos traz o benefício de regularizar mais rapidamente os níveis de tensão sem a realização de comutações desnecessárias.

4.5 Controlador em Tempo Real

Para o desenvolvimento do controlador em tempo real foi utilizada lógica *Fuzzy*. Este controlador é utilizado para definir a operação do controle centralizado a partir das variações

de corrente e tensão com possibilidade de transgressão nos transformadores da zona de regulação, gerando alarmes no sistema SCADA com indicativos da necessidade de operação dos reguladores. Estes controles estão presentes nos controladores individuais, onde são responsáveis pela geração de respostas não solicitadas ao sistema SCADA, e no controle centralizado onde monitorando as alterações nos estados dos equipamentos de proteção e manobras, identificam variações de tensão e carregamento, gerando alarmes para ativar a operação do controle em tempo real, como pode ser visto na Figura 4.19

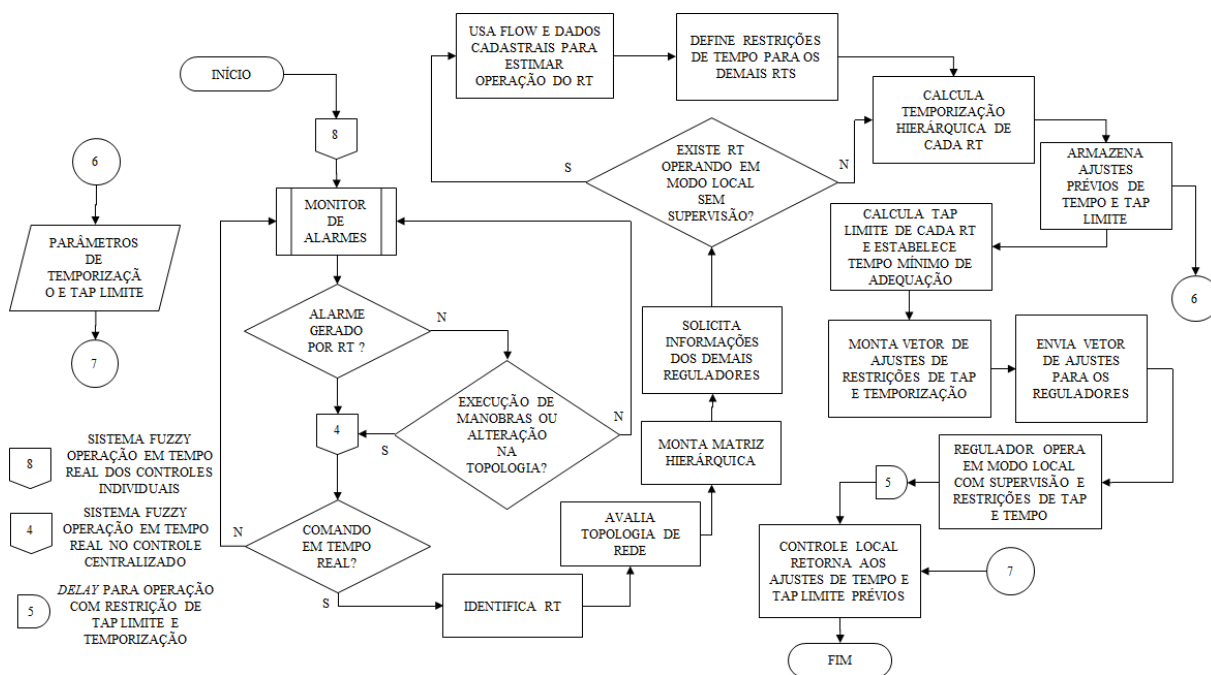


Figura 4.19 – Fluxograma do controlador em tempo real

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considera a avaliação da tensão e carga, como ilustra a Figura 4.20, sendo a tensão avaliada sob dois aspectos, considerando a variação de tensão e a faixa na qual se encontra conforme os limites regulatórios, e então gera alarmes para elevar ou reduzir posições de TAP em cada regulador de tensão identificado para a restauração da tensão, ou solicitações para verificação da tensão, através da atuação do controle hierárquico.

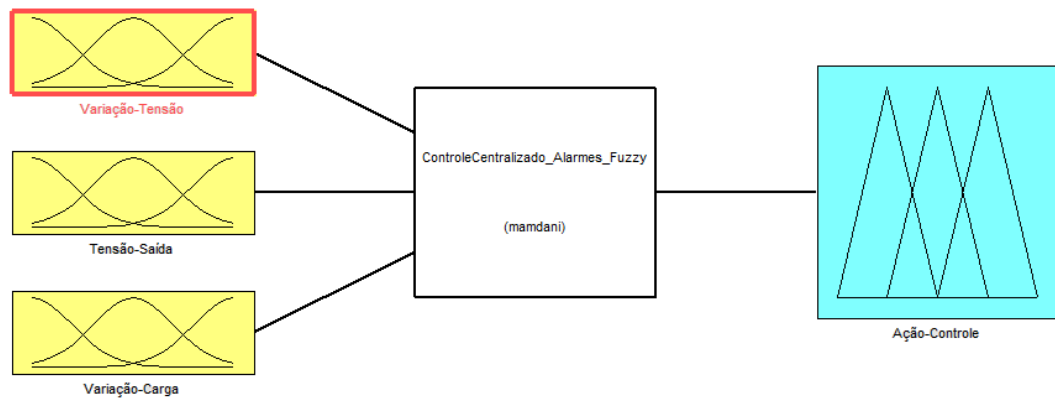


Figura 4.20 – Diagrama do controlador *Fuzzy* e suas respectivas entradas

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a variável de entrada foram utilizadas funções de pertinência trapezoidais, cujas faixas para a Variação de Tensão, Tensão de Saída e Variação de Carga são apresentadas respectivamente na Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23.

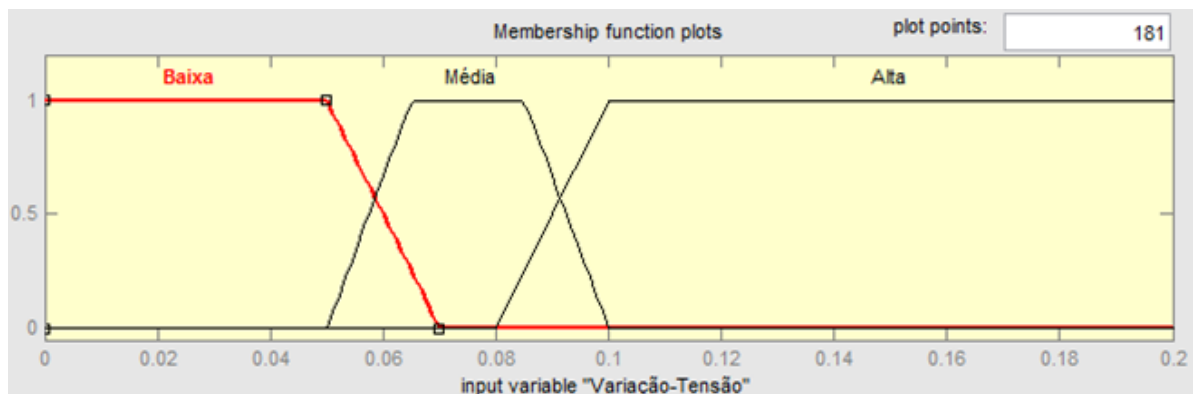


Figura 4.21 – Funções de Pertinência para as Entradas de do Controlador *Fuzzy*

Fonte: Elaborado pelo autor.

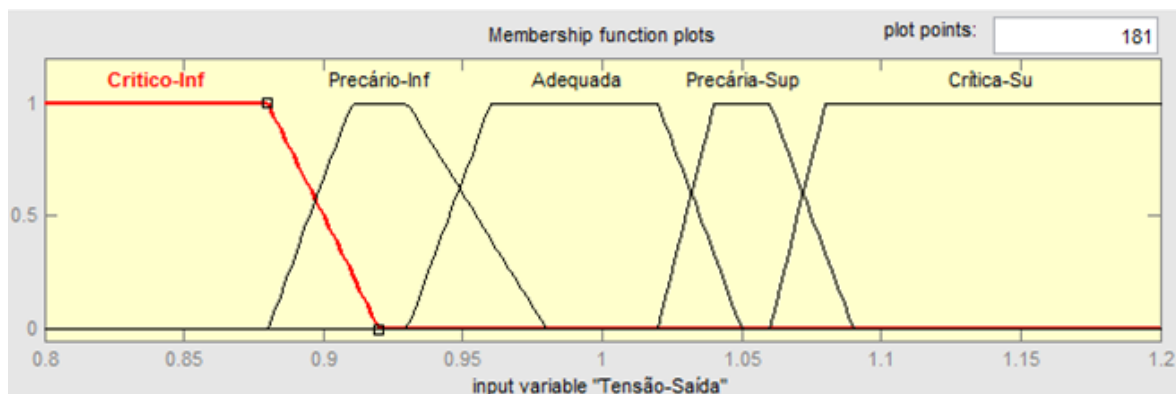


Figura 4.22 – Funções de Pertinência para as Entradas de do Controlador *Fuzzy*

Fonte: Elaborado pelo autor.

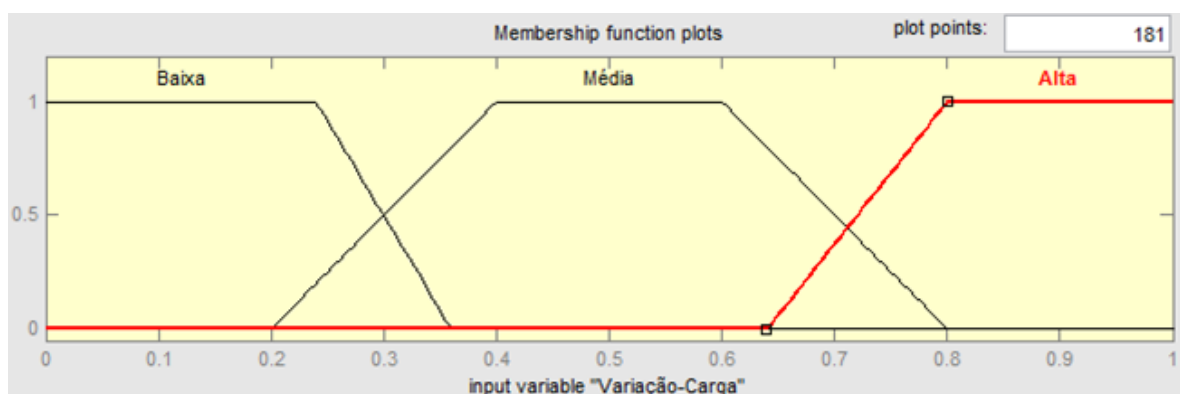


Figura 4.23 – Funções de Pertinência para as Entradas de do Controlador *Fuzzy*

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros de cada conjunto e as funções representativas das variáveis de entrada Variação da Tensão, Tensão de Saída e Variação da Carga do controlador são apresentados respectivamente em Tabela 4.5, Tabela 4.6 e Tabela 4.7.

Tabela 4.5 – Funções e parâmetros *Fuzzy* para a variável Variação de Tensão

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Baixa	Trapezoidal	0,000	0,00	0,050	0,070
Média	Trapezoidal	0,050	0,065	0,085	0,100
Alta	Trapezoidal	0,08	0,100	0,200	0,200

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.6 – Funções e parâmetros *Fuzzy* para a variável Tensão de Saída

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Crítico Inferior	Trapezoidal	0,80	0,80	0,88	0,92
Precário Inferior	Trapezoidal	0,88	0,91	0,94	0,97
Adequada	Trapezoidal	0,94	0,96	1,02	1,05
Precária Superior	Trapezoidal	1,02	1,04	1,06	1,08
Crítica Superior	Trapezoidal	1,06	1,08	1,20	1,20

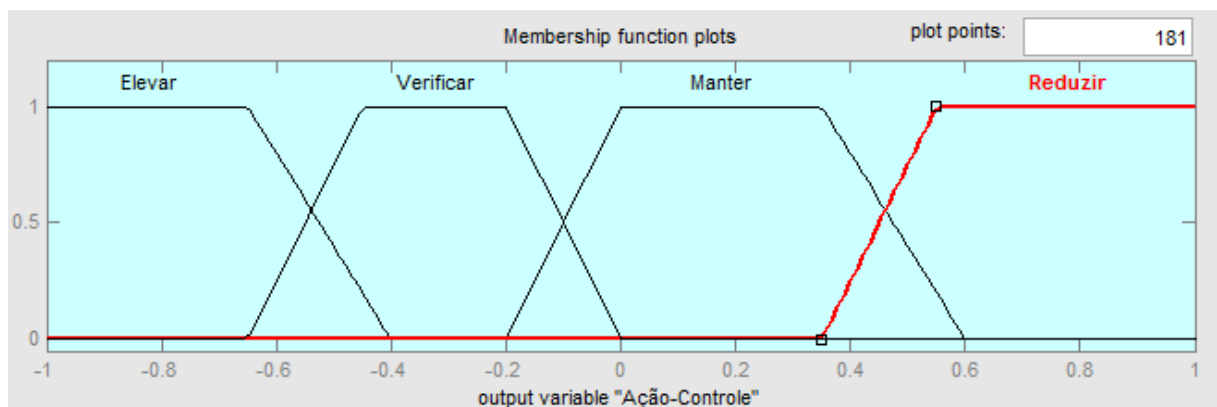
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.7 – Funções e parâmetros *Fuzzy* para a variável Variação de Carga

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Crítico Inferior	Trapezoidal	0,00	0,00	0,25	0,35
Precário Inferior	Trapezoidal	0,20	0,40	0,60	0,80
Adequada	Trapezoidal	0,65	0,80	1,00	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A saída resulta em alarmes nas condições de “Elevar” e “Reduzir” posições de TAP, além do comando de “Verificar” que ativam o controle hierárquicos e a operação em tempo real dos reguladores. Caso o sistema esteja adequado a saída do controlador indica a condição “Manter”, não gerando nenhum alarme no sistema SCADA. Com essa resposta do controlador, os reguladores operam sem a interferência do controle centralizado. Essas condições são ilustradas na Figura 4.24.

Figura 4.24 – Saída do Controlador *Fuzzy*

Fonte: Elaborado pelo autor. Extraído do software MATLAB

Tabela 4.8 – Funções e parâmetros *fuzzy* para a variável Ação de Controle

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	B
Elevar	Trapezoidal	-1,00	-1,00	-0,65	-0,40
Verificar	Trapezoidal	-0,65	-0,45	-0,20	0,00
Manter	Trapezoidal	-0,20	0,00	0,35	0,55
Reduzir	Trapezoidal	0,35	0,55	1,00	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Da mesma forma que o controlador local individual é destinado a definição da insensibilidade, para o controle em tempo real o resultado da variável de saída é obtido pela aplicação de um conjunto de regras *Fuzzy* que relacionam as variáveis de entrada. Este conjunto de regras é apresentado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Regras para definição da Insensibilidade utilizadas no controlador Fuzzy

Variáveis de Entrada			Saída
Variação de Tensão	Variação de Carga	Tensão de Saída	Ação de Controle
-	-	Crítico Inferior	Elevar
-	-	Crítico Superior	Reduzir
Baixa	Baixa	Precário Inferior	Manter
Baixa	Média	Precário Inferior	Elevar
Baixa	Alta	Precário Inferior	Elevar
Média	Baixa	Precário Inferior	Elevar
Média	Média	Precário Inferior	Elevar
Média	Alta	Precário Inferior	Elevar
Alta	-	Precário Inferior	Elevar
Alta	Alta	Adequada	Verificar

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 Aplicação Integrada do CHAT

O sistema de controle hierárquico e adaptativo proposto tem o objetivo de integrar os algoritmos desenvolvidos em um sistema centralizado, com comunicação direta com o sistema SCADA. A Figura 4.25 apresenta de forma simplificada a localização das principais funções deste controle.

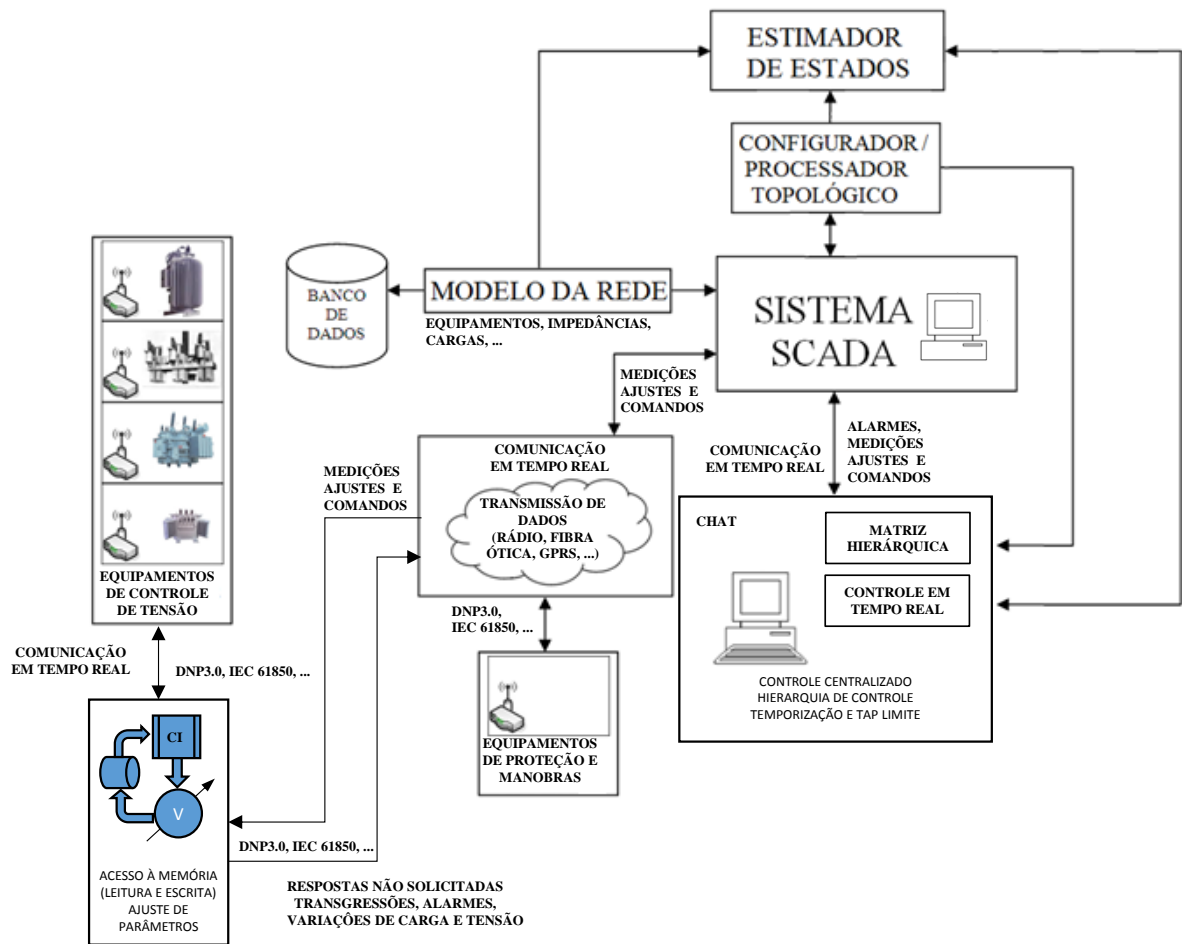


Figura 4.25 – Integração das metodologias desenvolvidas com o sistema SCADA

Fonte: Adaptado de (Pfitcher, 2013).

Uma visão mais ampla dos componentes do sistema de distribuição e a comunicação dos elementos que exercem influência direta no CHAT é apresentada na Figura 4.26.

Tabela 4.10 - Alarmes do Sistema SCADA para ativação do CHAT

Condição	Alarme	Ação
1. Elevar TAP	Tensão Baixa do RT(n)	Cálculo estimado do número de TAPs e tempo necessário para adequação da tensão; Análise da matriz hierárquica e avaliação da possibilidade de comutação dos TAPs dos demais reguladores.
2. Abaixar TAP	Tensão Alta no RT(n)	Cálculo estimado do número de TAPs e tempo necessários para adequação da tensão; Análise da matriz hierárquica e avaliação da possibilidade de comutação dos TAPs dos demais reguladores.
3. Fluxo Inverso	Inversão de Fluxo no RT(n)	Definição da Matriz Hierárquica na nova topologia. Recálculo dos parâmetros de regulação e de temporização dos reguladores.
4. Transição de Carga	Transição de Carga no RT(n)	Análise da Matriz Hierárquica, cálculo do tempo de regulação e avaliação da possibilidade de atuação instantânea dos reguladores.
5. Manobra ou Reconfiguração	Transição de Carga no RT(n)	Análise da Matriz Hierárquica, cálculo do tempo de regulação e avaliação da possibilidade de atuação instantânea dos reguladores.
4. Verificar Tensão	Transição de Carga ou Tensão no RT(n)	Análise da Matriz Hierárquica, cálculo do tempo de regulação e avaliação da possibilidade de atuação instantânea dos reguladores.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7 Considerações finais

Nesse capítulo foram apresentados os principais algoritmos desenvolvidos para a implementação da tese apresentada nesse trabalho. Apresentou a visão geral da metodologia proposta para o controle dos níveis de tensão e o detalhamento dos módulos de controle individual com sua forma de atuação e os principais benefícios obtidos com sua utilização. Cada módulo CI é responsável por sua própria zona de regulação, visando garantir uma faixa adequada de atendimento dos equipamentos presentes nessa área. Os ajustes de tensão de referência, compensação de queda de tensão na linha e faixa de insensibilidade são estabelecidos com esse objetivo, porém em um sistema que conta com a presença de vários reguladores faz-se necessária a coordenação na operação destes equipamentos. Para isso deve ser estabelecida de forma adequada a temporização entre os reguladores, buscando essa coordenação e criando uma hierarquia destes dispositivos de controle.

Outro ponto importante da aplicação do controle individual encontra-se no processamento distribuído do controle de tensão, uma vez encontra-se acoplado em cada um dos reguladores de tensão o módulo de controle que monitora as grandezas, compara com os

valores históricos e identifica a necessidade de alteração dos ajustes. Somente após a execução de todas estas etapas é que a informação passa para o sistema centralizado, que atualiza os parâmetros de temporização de acordo com a hierarquia de controle, desonerando tanto o sistema SCADA como o sistema de controle da necessidade de monitoramento e processamento constantes destes equipamentos.

Foi também apresentado o controle hierárquico descrevendo como é estabelecida a hierarquia de controle e a forma de atuação do controle centralizado com a operação em tempo real dos reguladores.

A utilização de funções para a parametrização dos reguladores, a validação desses parâmetros pelo controle centralizado, a alteração do tipo de temporização em tempo de execução e o controle *Fuzzy* para tempo real são os principais blocos que compõem o controle hierárquico adaptativo de tensão.

Para a integração da metodologia, fazem-se necessárias adequações no sistema de supervisão. Alarmes adicionais devem ser configurados, além da preparação de um *driver* de comunicação entre o sistema SCADA e a ferramenta CHAT, garantindo a integridade e a padronização dos dados.

5 APLICAÇÃO PRÁTICA

Este capítulo considera a operação do controle de tensão em um sistema de distribuição, na transição entre os patamares de carga considerando a dinâmica operativa dos reguladores de tensão e a influência mútua exercida sobre os demais reguladores da rede. Não foram avaliados os aspectos relacionados à performance do processamento, tempos de resposta dos módulos de controle e sistema de comunicação. As simulações consideram o sistema operando com o modo normal e com a aplicação da metodologia desenvolvida nesta tese permitindo a realização de um comparativo entre os métodos.

5.1 Descrição do Sistema Teste

Para análise da metodologia apresentada foram realizadas simulações em uma adaptação do sistema IEEE 34 *Node Test Feeder*, cujo original pode ser visto na Figura 5.1.

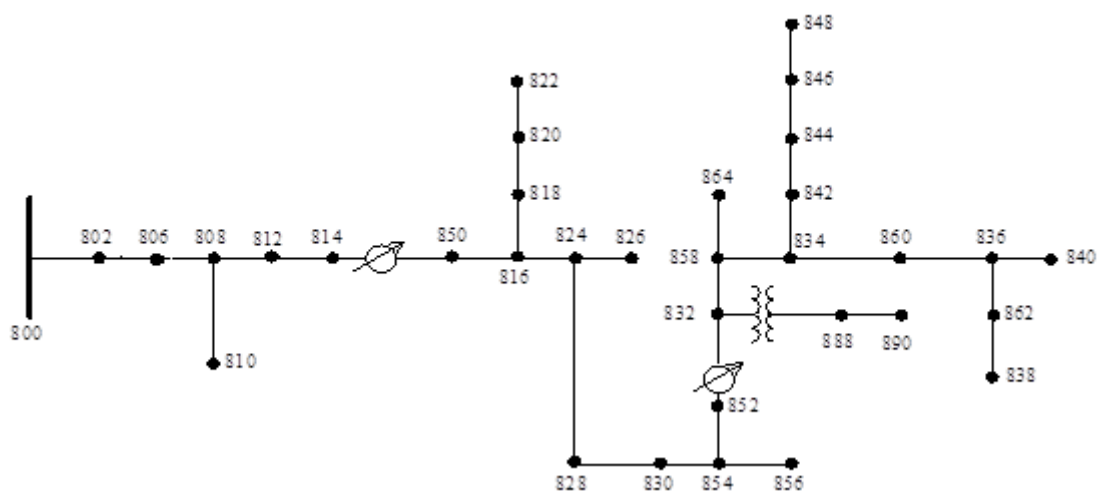


Figura 5.1 - Sistema teste IEEE 34 barras original

Fonte: IEEE Distribution Planning Working Group Report (2010)

A versão modificada, apresentada na Figura 5.2, é composta por 2 alimentadores idênticos, baseados no sistema IEEE 34 barras, com possibilidade de transferência de cargas entre eles. As cargas foram modeladas como potência constante e foi utilizada para todos os transformadores curvas de cargas tipicamente residenciais. Cada alimentador possui 3

reguladores de tensão em série, sendo o primeiro responsável pelo controle na barra da subestação e os demais controlam trechos intermediários da rede de distribuição.

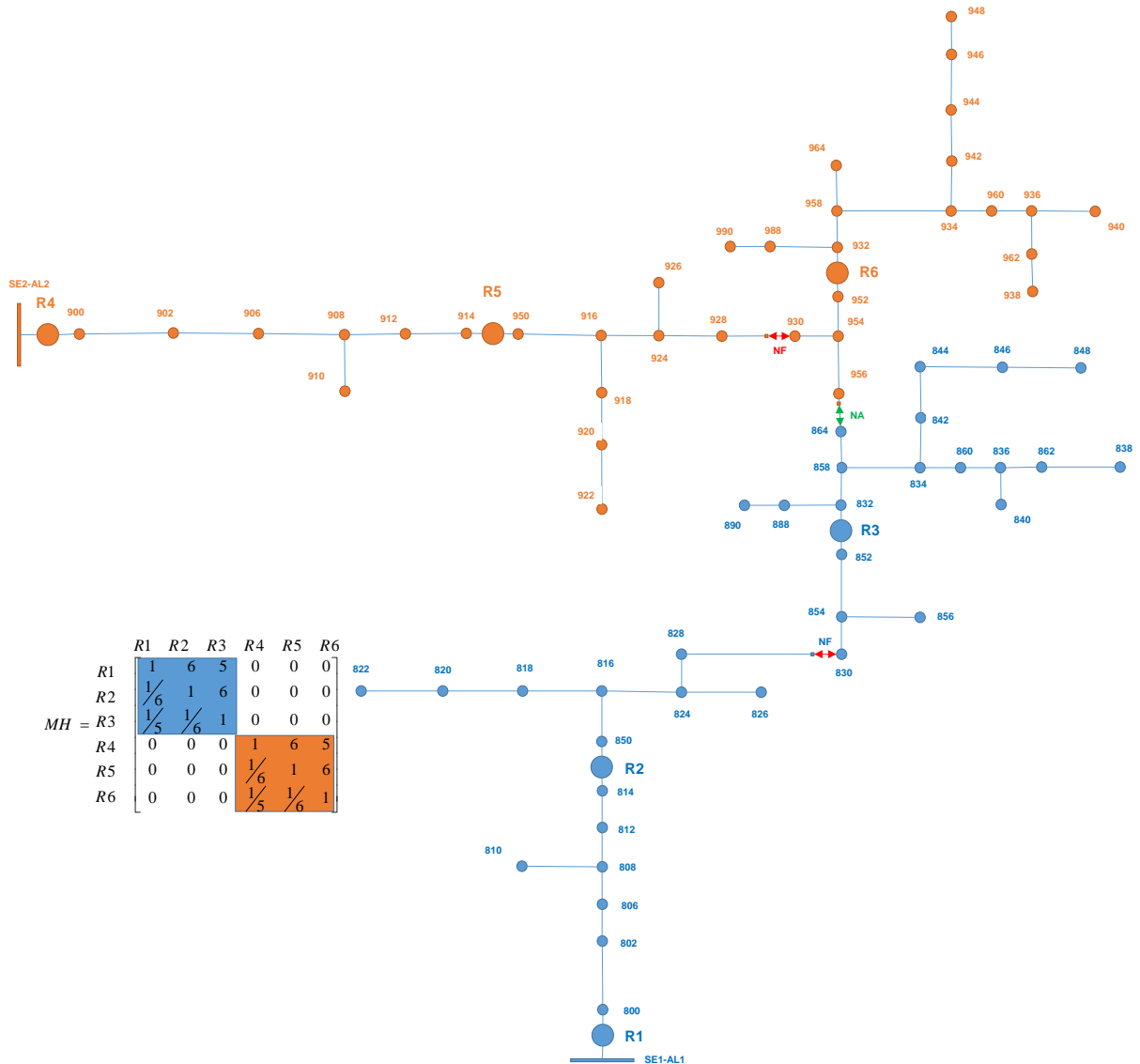


Figura 5.2 - Sistema teste – configuração original

Fonte: Elaborado pelo autor.

As características da rede como condutores, comprimentos dos trechos são apresentadas no apêndice A, enquanto os valores nominais das cargas encontram-se no Apêndice B. A curva de carga dos alimentadores é apresentada na Figura 5.3.

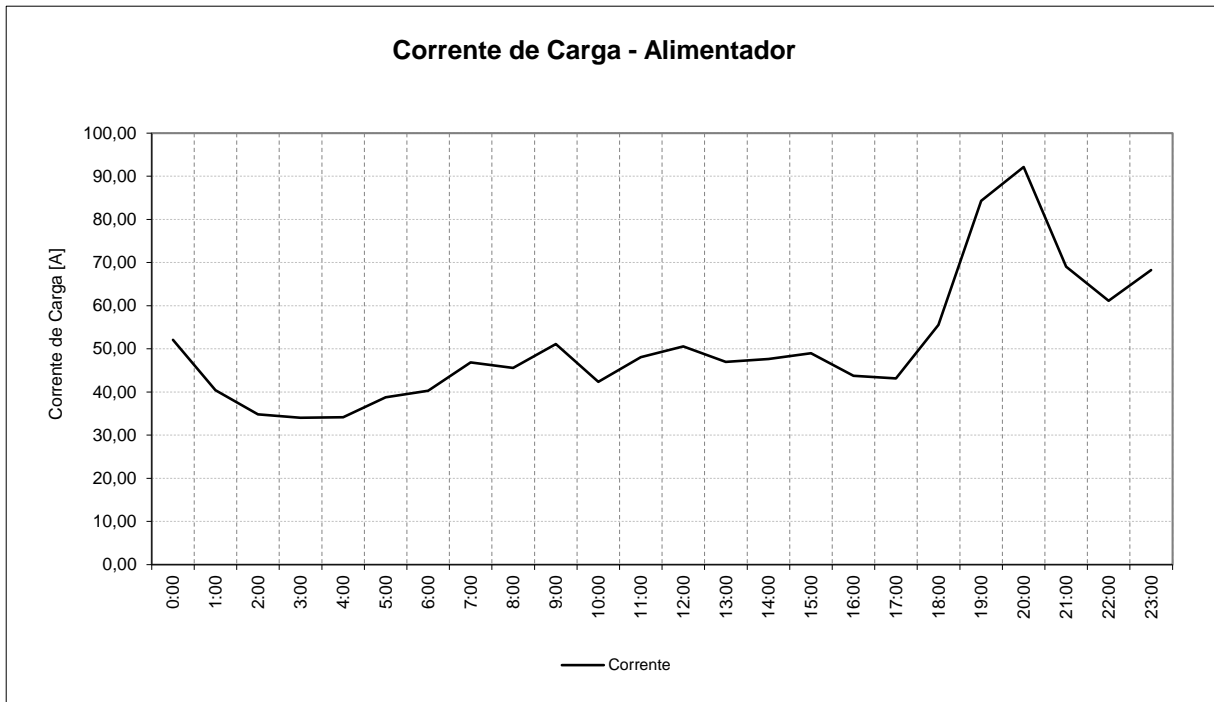


Figura 5.3 – Curva de carga do alimentador – sistema teste na configuração original

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a análise do comportamento dos controles devido a realização de uma transferência de cargas foi avaliada uma configuração manobrada, cuja proposta para o estudo consiste na transferência do bloco de cargas atendido pelo regulador R6 do AL 2 para o AL 1. Essa transferência se dá pela abertura da chave NF do nó 930 do AL2 e pelo fechamento da chave NA do nó 864 do AL1 totalizando 4 reguladores de tensão em série no AL1. A configuração resultante do sistema após a execução da manobra pode ser visualizada na Figura 5.4.

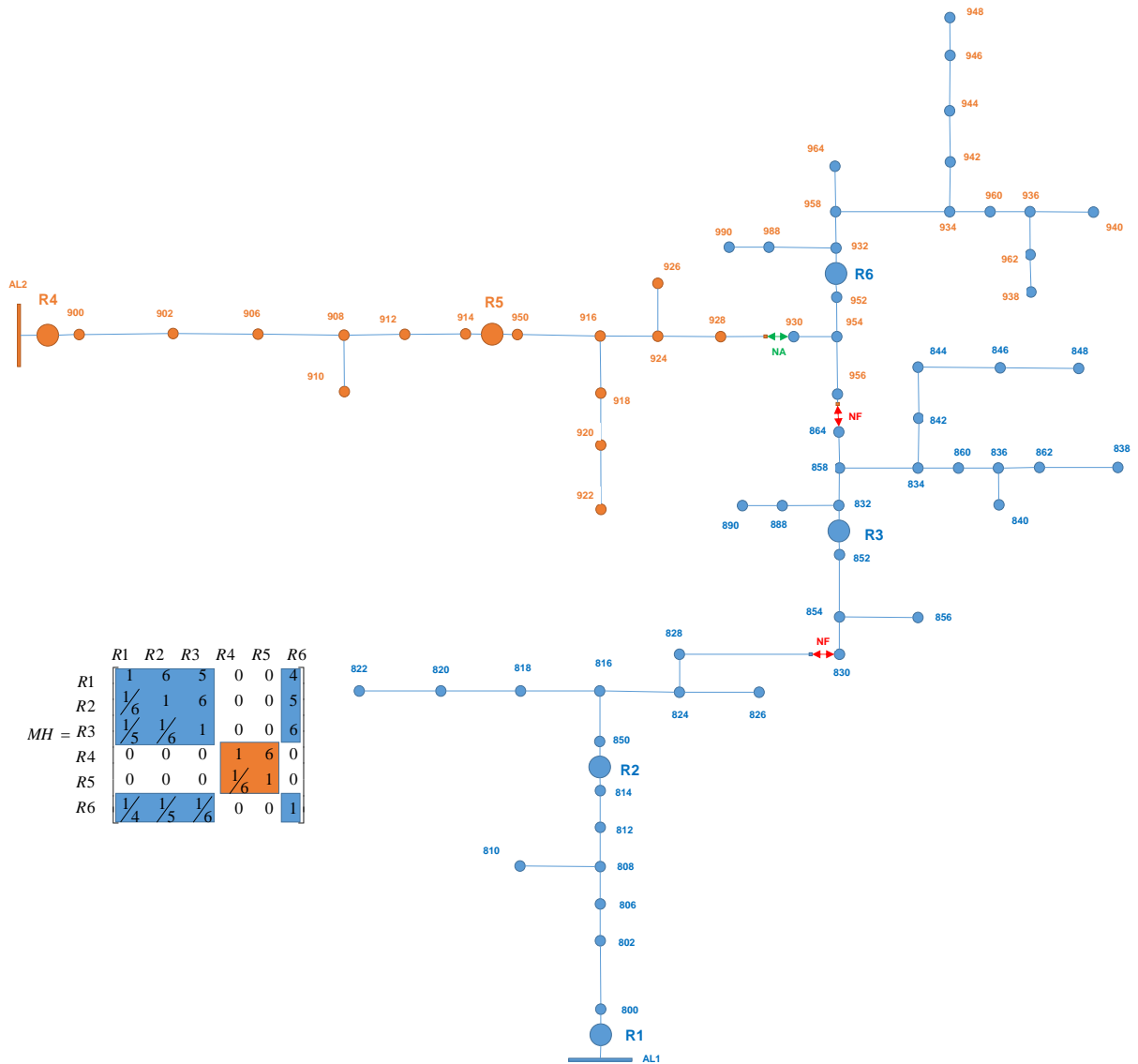


Figura 5.4 - Sistema Teste na Configuração Após a Manobra

Fonte: Elaborado pelo autor.

A carga correspondente a essa transferência é representada pela curva exibida na Figura 5.5.

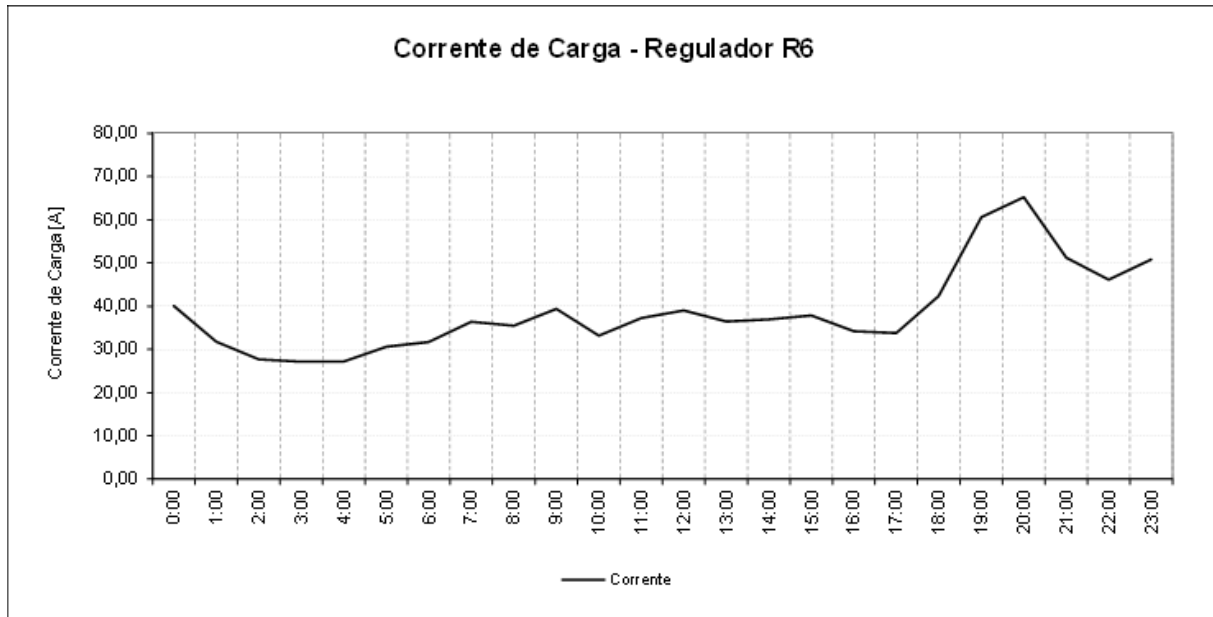


Figura 5.5 – Curva de carga do regulador R6 – carga a ser transferida do AL2 para o AL1

Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir serão avaliados os cenários propostos para este estudo de caso cujas condições estudadas são apresentadas na tabela Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Cenários de estudo para a aplicação prática

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7
Configuração da Rede	Original	Original	Original	Manobrada	Manobrada	Original – R2 sem CHAT	Original – R3 sem CHAT
Temporização	Linear	Linear e não sequencial em R1	Linear em R1 e Inversa em R2 e R3	Linear	Linear	Linear	Linear
Ajustes	Originais	Originais	Originais	Originais	Novos Ajustes	Originais	Originais

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada cenário foi realizado um comparativo entre a aplicação do controle de tensão convencional e a aplicação da metodologia CHAT. Os ajustes dos reguladores foram calculados aplicando a metodologia de controle individual, adequando os equipamentos aos cenários de carregamento propostos, com as temporizações coordenadas com base na matriz hierárquica.

5.2 Cenário 1 – Sistema em Operação Normal

Neste cenário, os alimentadores foram simulados na sua configuração original, como descrito anteriormente, com as condições de carregamento, características do sistema e ajustes idênticos para ambos.

Foram avaliadas duas situações, para as quais, foram realizadas as simulações apresentando na primeira a operação normal dos reguladores de tensão e na segunda o efeito da aplicação da metodologia CHAT.

A partir destas simulações realizou-se o comparando dos resultados obtidos em termos de tempo de regularização, número de comutações e severidade das transgressões. No cenário 1 foi considerada a configuração original do sistema, com três reguladores de tensão em cada alimentador. Os ajustes dos equipamentos para o cenário 1 são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Ajustes dos reguladores de tensão

	AL1			AL2		
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
I_{Nominal} [A]	200	200	200	200	200	200
V_{Ref} [pu]	1,009	1	1	1,009	1	1
U_{R} [pu]	0,078	0,061	0,078	0,078	0,061	0,078
U_{X} [pu]	0,052	0,035	0,043	0,052	0,035	0,043
Ins [pu]	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
Load Bonus	1	1	1	1	1	1
TAP Limite	16	16	16	16	16	16
t_1 [s]	15	30	45	15	30	45
t_2 [s]	0	0	0	0	0	0
t_{Com} [s]	3	3	3	3	3	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como se tratam de alimentadores idênticos, a avaliação foi realizada considerando apenas os equipamentos do AL1. A Figura 5.6 ilustra a operação normal dos reguladores de tensão, na transição entre o patamar das 19 h para o das 20 h.

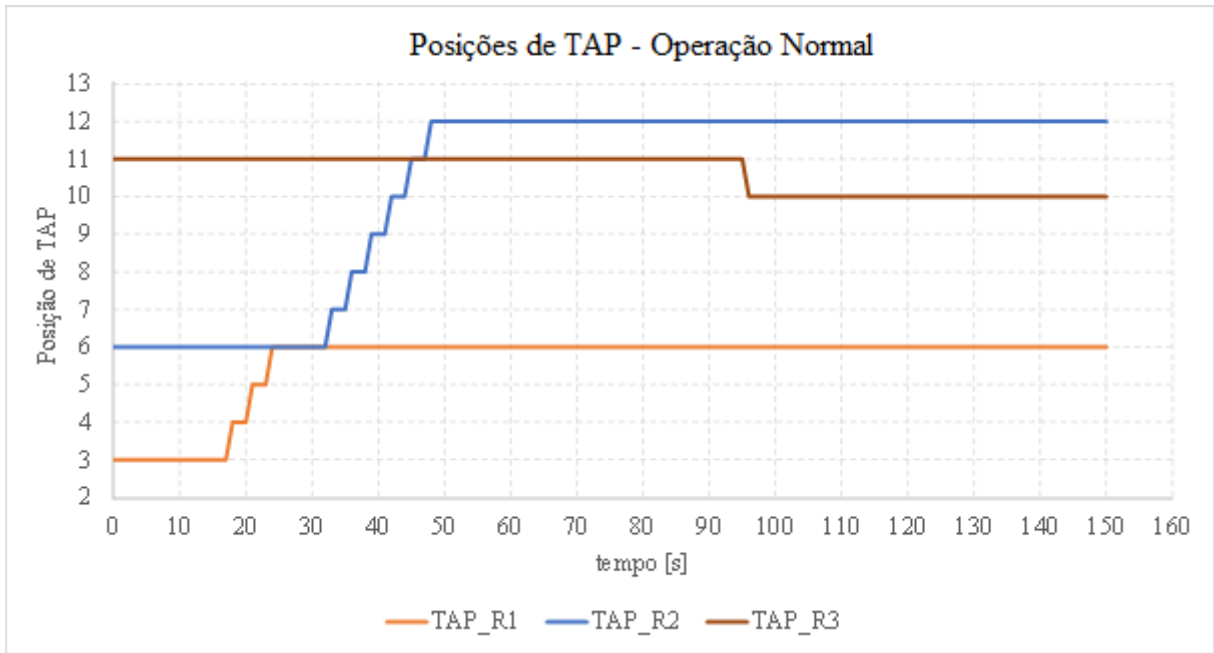


Figura 5.6 - Comutações de TAP em Operação Normal – Cenário 1

Fonte: Elaborado pelo autor.

O efeito destas operações, associado a influência dos reguladores entre si, resultam nas tensões de saída apresentadas na Figura 5.7.

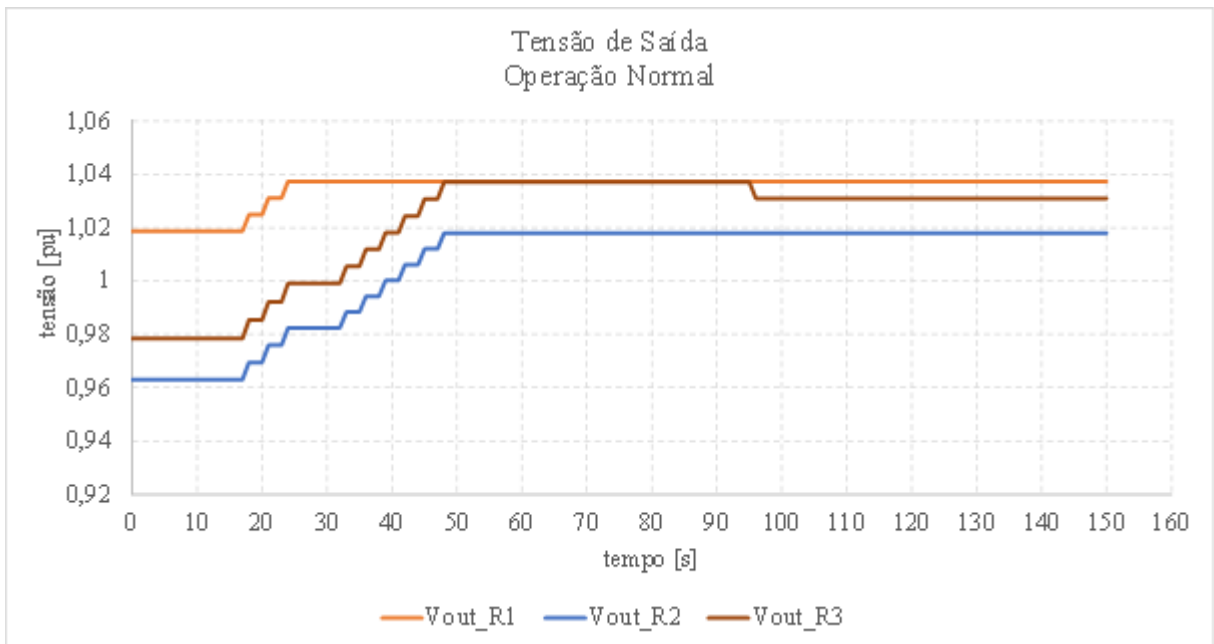


Figura 5.7 - Tensão de Saída em Operação Normal – Cenário 1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que os ajustes de temporização utilizados, mantêm a sequência de operação iniciando pelos reguladores mais próximos da fonte, deixando para o final os equipamentos mais distantes. No entanto, quando a fonte é regularizada, são ainda necessárias algumas comutações adicionais para adequar os demais reguladores.

Ao utilizar o controle centralizado, acelera-se o processo de comutação fazendo com que todos os reguladores iniciem as comutações. Como pode ser visto na Figura 5.8, a duração das transgressões foi menor do que na condição anterior. Além disso o número de comutações também foi reduzido.

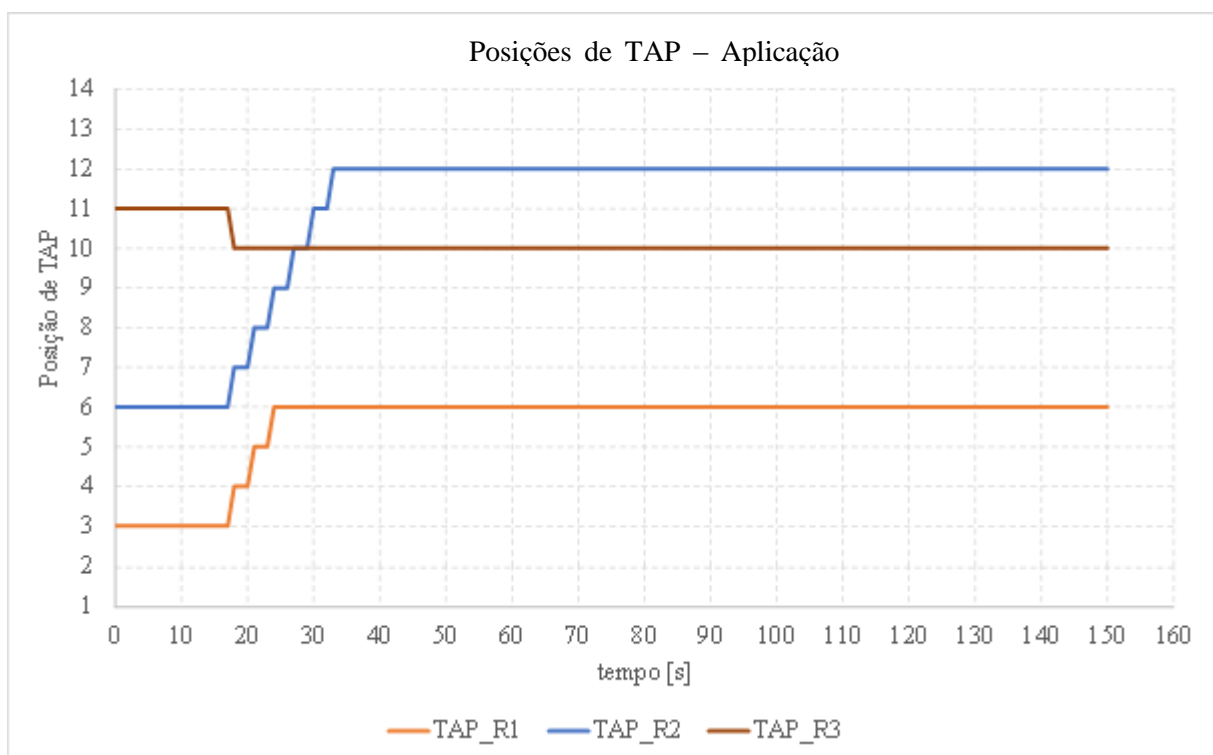


Figura 5.8 - Comutações de TAP com Controle Centralizado – Cenário 1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta configuração a regularização ocorre mais depressa, resultando nas tensões de saída mostradas na Figura 5.9.

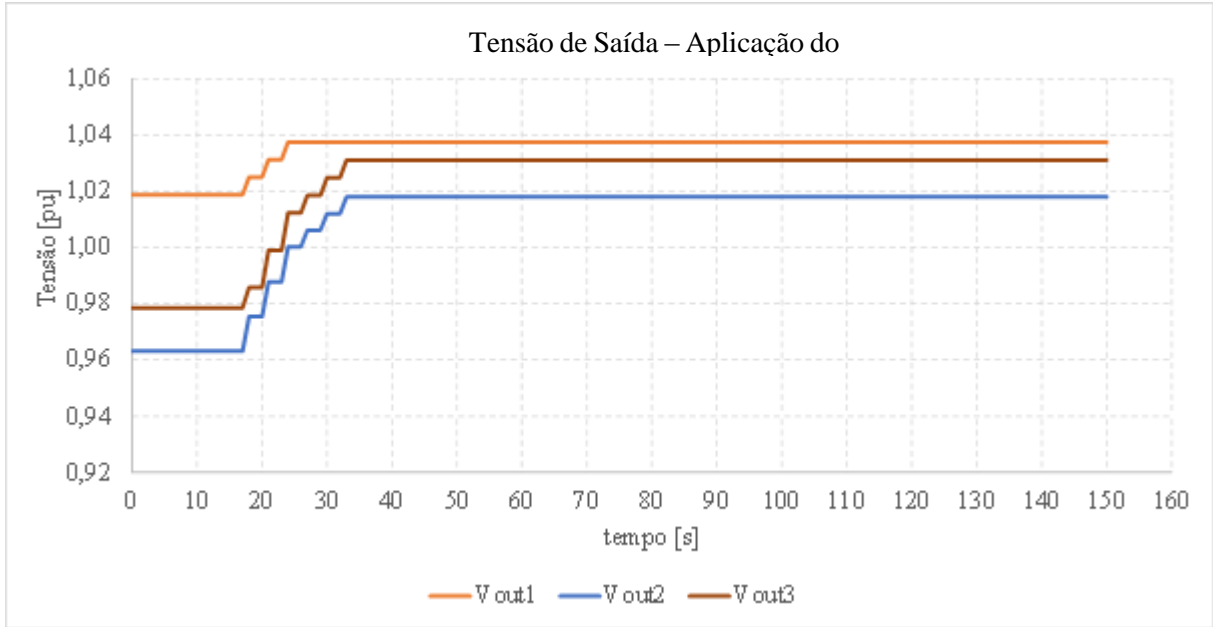


Figura 5.9 - Tensão de Saída com Controle Centralizado – Cenário 1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando comparada com a operação normal dos reguladores, nota-se que a severidade das transgressões foi reduzida em todos os reguladores, como pode ser visto na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Número de Comutações e Severidade das Transgressões

	Indicador	R1	R2	R3
Operação Normal	Número de Comutações	3	6	1
	Índice de Severidade [pu·s]	0,274	1,656	1,162
	Regularização da Tensão [s]	24s	48s	96s
CHAT	Número de Comutações	3	6	1
	Índice de Severidade [pu·s]	0,274	1,183	0,816
	Regularização da Tensão [s]	24s	33s	18s

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para uma melhor compreensão do índice de severidade, tem-se na Figura 5.10, um comparativo entre a operação normal e a com o uso do CHAT nos três reguladores de tensão.

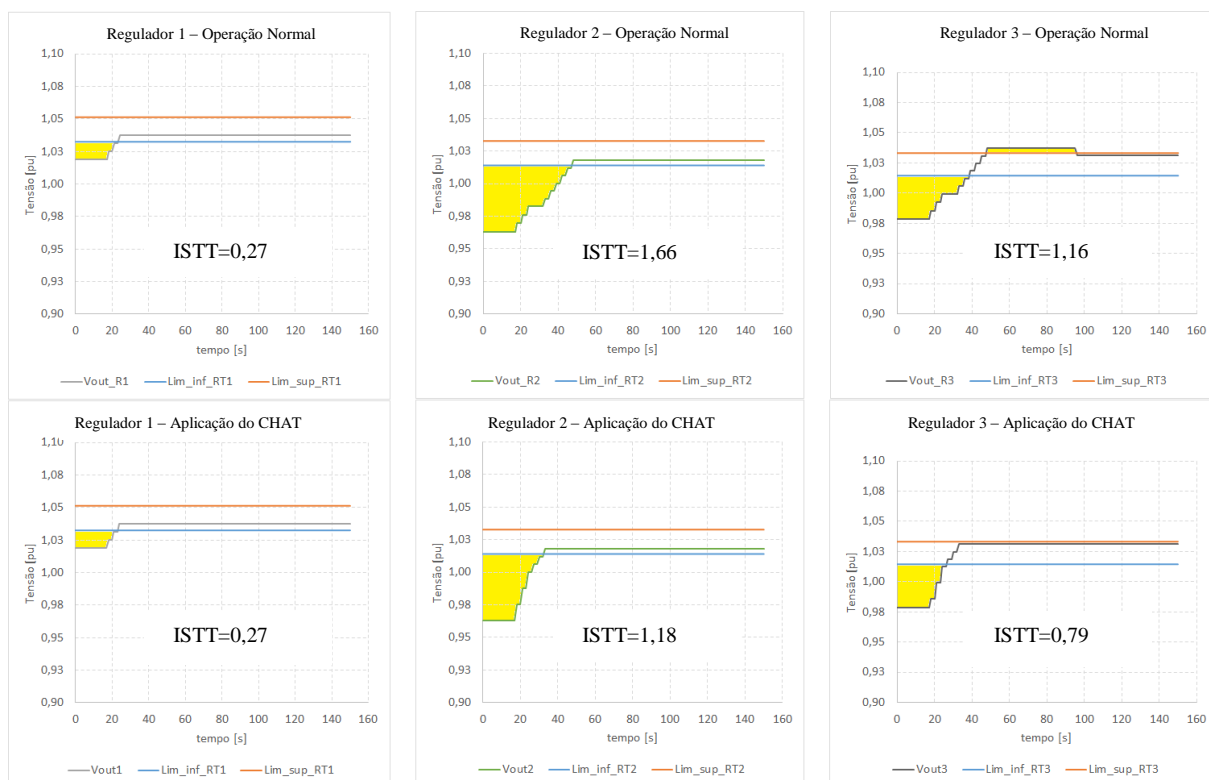


Figura 5.10 - Tensão de saída e índice de severidade – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 1

Fonte: Elaborado pelo autor.

A aplicação da metodologia para uma curva de 24 patamares quando comparada com a operação normal dos equipamentos permite identificar a melhoria obtida com a o uso do CHAT, considerando a intervenção do sistema na transição entre os patamares. Na Tabela 5.4, é apresentado o resumo dos resultados com os três reguladores do sistema, destacando o número de comutações e o índice de severidade acumulados e o máximo tempo de regularização da tensão.

Tabela 5.4 - Número de Comutações e Severidade das Transgressões

	Indicador	R1	R2	R3
Operação Normal	Número de Comutações	17	51	48
	Índice de Severidade	1,97	10,265	22,498
	Regularização da Tensão	24	48	96
CHAT	Número de Comutações	17	51	48
	Índice de Severidade	1,97	6,816	11,974
	Regularização da Tensão	24	33	51

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Cenário 2 – Operação não sequencial na Subestação – RT1

Uma análise do efeito da temporização entre as comutações pode ser realizada alterando o modo de operação do regulador RT1. Neste segundo cenário foram mantidos todos os parâmetros dos equipamentos, alterando apenas a temporização entre comutações (t_2) do primeiro regulador passando de 0 s para 5 s. Como não foi realizada alteração de topologia, a matriz hierárquica se mantém inalterada, sendo identificado impacto do modo de operação no número de comutações dos reguladores e no tempo de regularização dos níveis de tensão. Ilustrando este efeito, A Figura 5.6 apresenta a operação normal dos reguladores de tensão, na transição entre o patamar das 19 h para o das 20 h.

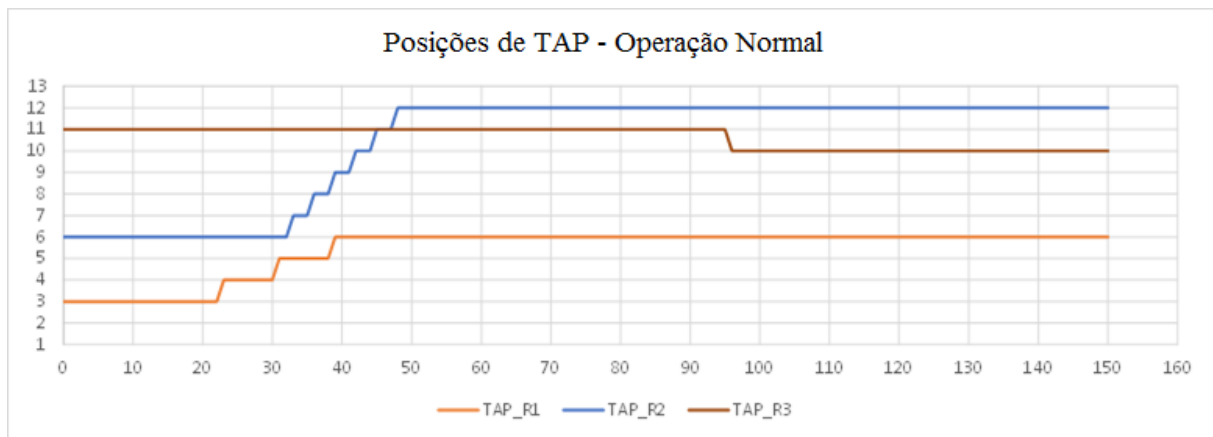


Figura 5.11 - Comutações de TAP em Operação Normal – Cenário 2

Fonte: Elaborado pelo autor.

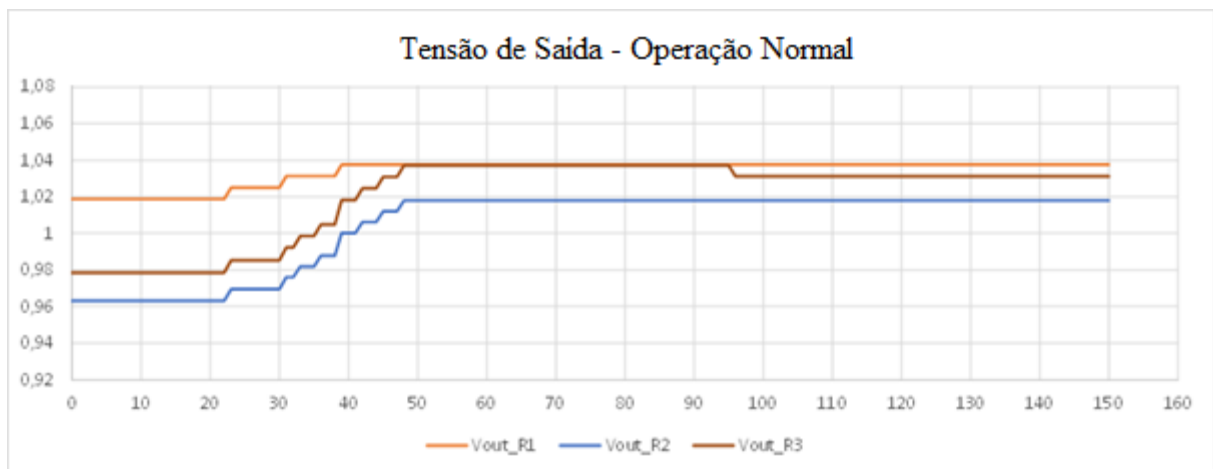


Figura 5.12 - Tensão de Saída em Operação Normal – Cenário 2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a utilização do sistema hierárquico, os resultados apresentaram um comportamento similar aos encontrados no cenário 1, para o alimentador em análise. Pode-se verificar na Figura 5.13 o mesmo número de operações, porém com uma redução no tempo de comutação nos reguladores.

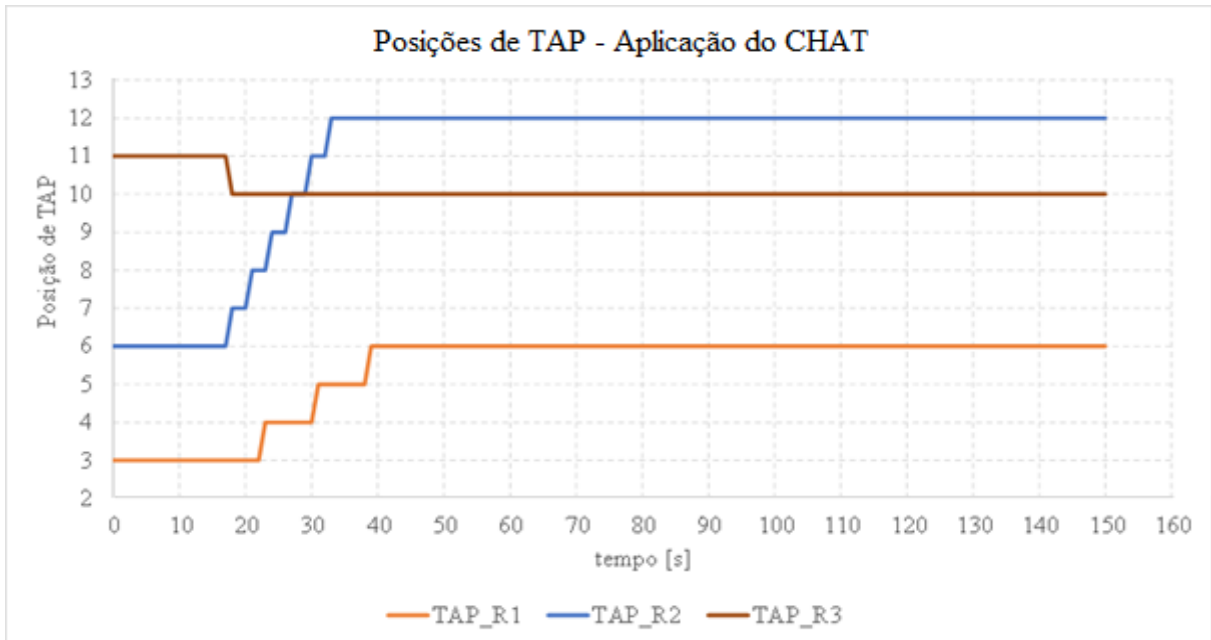


Figura 5.13 - Comutações de TAP com aplicação do CHAT – Cenário 2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste caso a tensão é regularizada mais rapidamente, como visto na Figura 5.14.

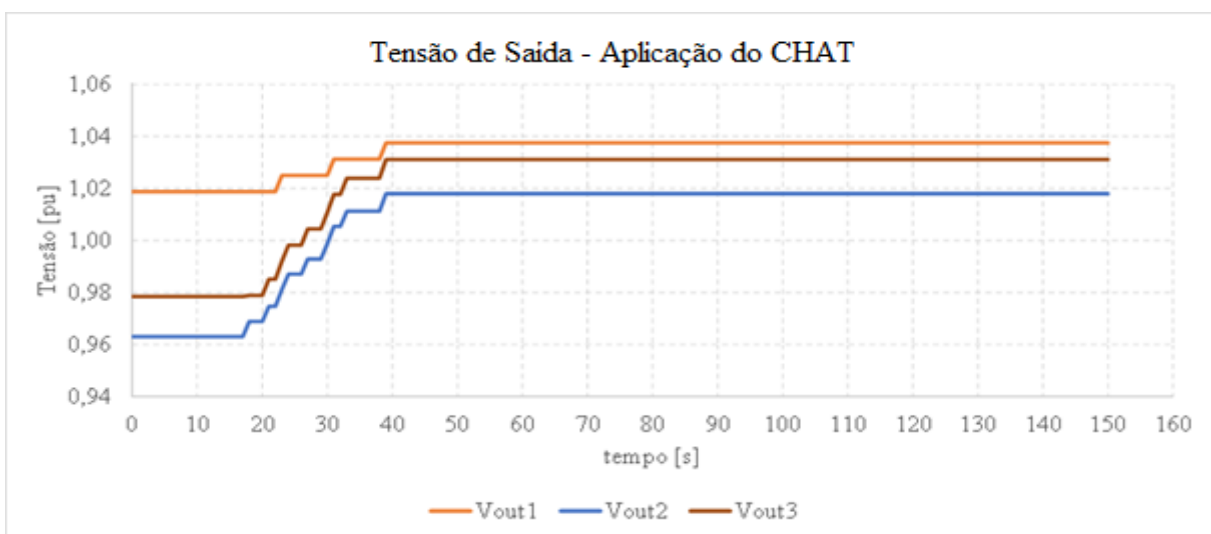


Figura 5.14 - Tensão de Saída com aplicação do CHAT – Cenário 2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando o ISTT obtido com a aplicação do CHAT em relação aos valores obtidos para o índice em operação normal nota-se, conforme apresentado na Figura 5.15, uma redução das áreas de transgressão com o uso do controle centralizado.

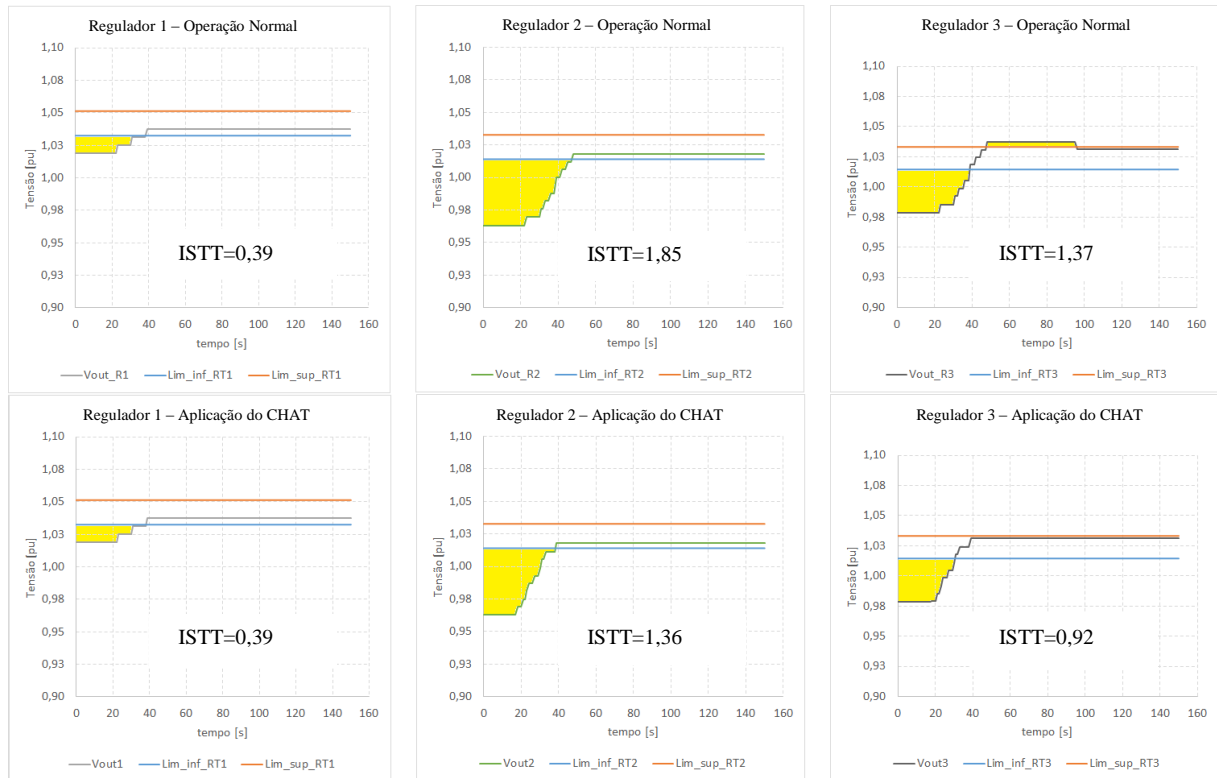


Figura 5.15 - Tensão de saída e índice de severidade – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que pela inclusão do tempo entre as comutações um aumento no tempo de regularização do sistema. Mesmo com a aplicação do CHAT o regulador RT1 tem o maior tempo de retardo e este efeito pode ser necessário ao considerar a coordenação entre os reguladores das subestações de transmissão cuja necessidade de controle do número de operações é mais representativo dados os custos destes equipamentos.

5.4 Cenário 3 – Temporização Inversa nos reguladores R2 e R3

Uma análise do efeito da temporização entre as comutações pode ser realizada aplicando a temporização inversa (TI) nos reguladores R2 e R3. Neste cenário 3 foram também mantidos

os demais parâmetros dos equipamentos, alterando apenas a o tipo de temporização aplicada, mantendo o tempo linear (TL) no regulador R1. Da mesma forma que no cenário 2, a matriz hierárquica se mantém inalterada. Ilustrando este efeito, A Figura 5.6 apresenta a operação normal dos reguladores de tensão, na transição entre o patamar das 19 h para o das 20 h.

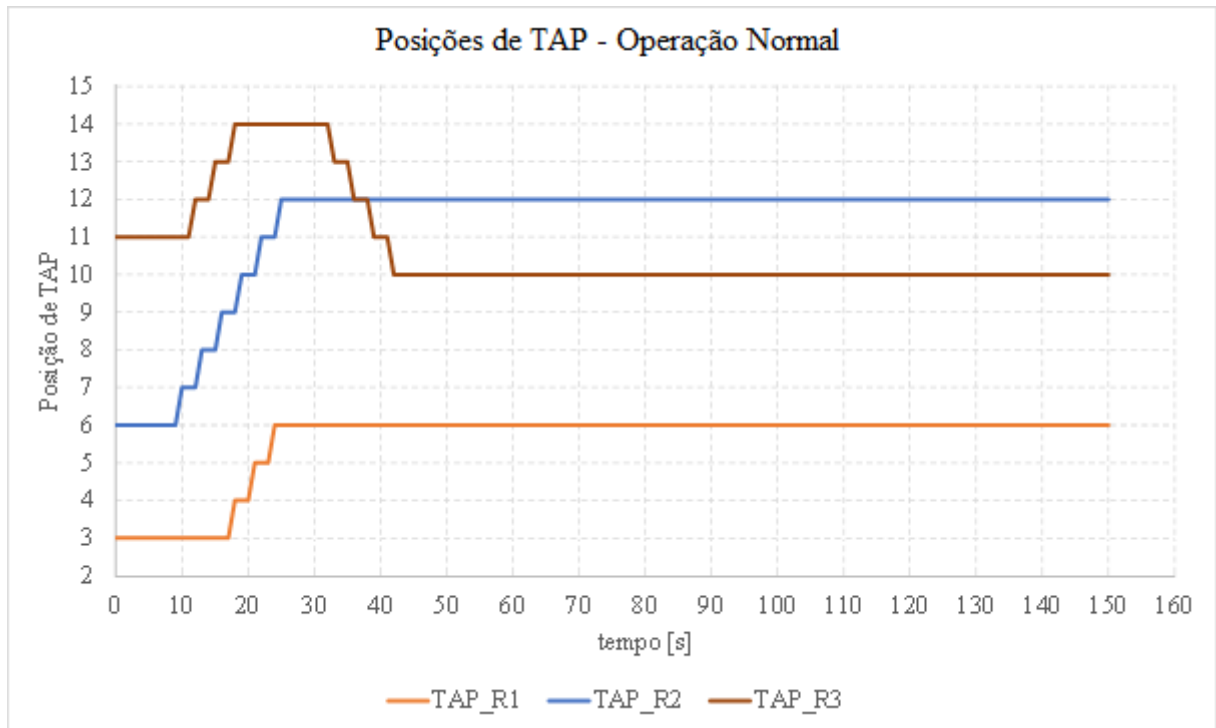


Figura 5.16 - Comutações de TAP em Operação Normal – Cenário 3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se, neste caso, que a combinação do uso da TL em operação convencional resulta em uma elevação de tensão desnecessária no regulador R3, visto que são realizadas mais comutações neste equipamento para reduzir os níveis de tensão, com apresenta a Figura 5.17.

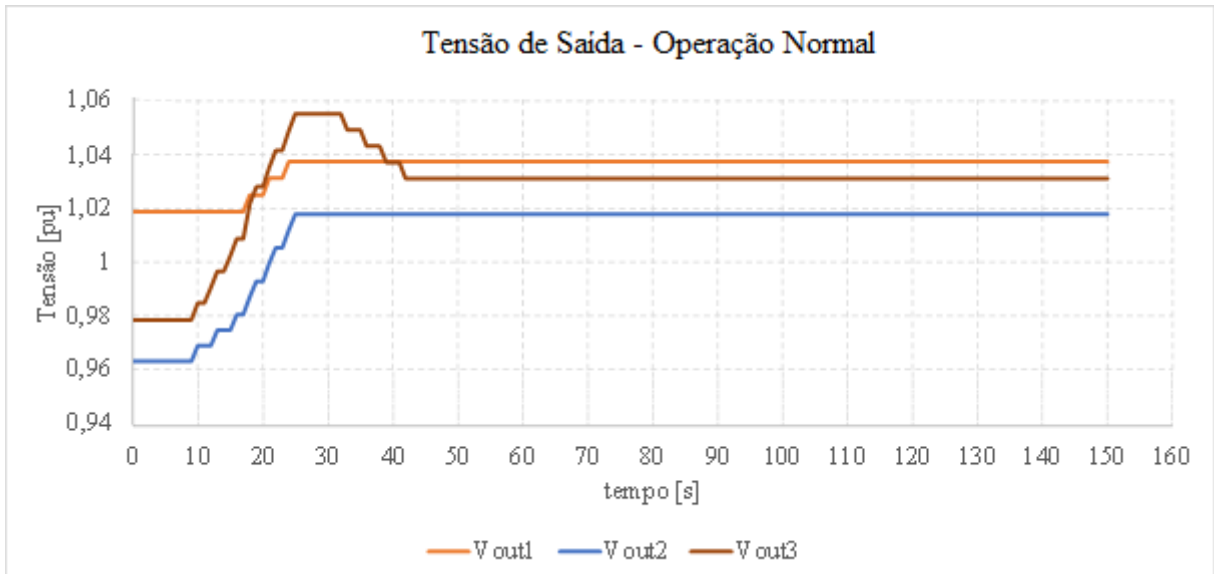


Figura 5.17 - Tensão de Saída em Operação Normal – Cenário 3

Fonte: Elaborado pelo autor.

A operação centralizada e hierárquica dos reguladores de tensão traz resultados mais adequados, tanto para os reguladores como para os níveis de tensão, pois apresenta uma menor quantidade de chaveamentos devido a limitação imposta pelo CHAT no regulador R3 e pela antecipação do início do processo de comutação. A Figura 5.18 ilustra o número de comutações realizada em cada regulador devido à combinação entre temporização inversa e emprego do CHAT.

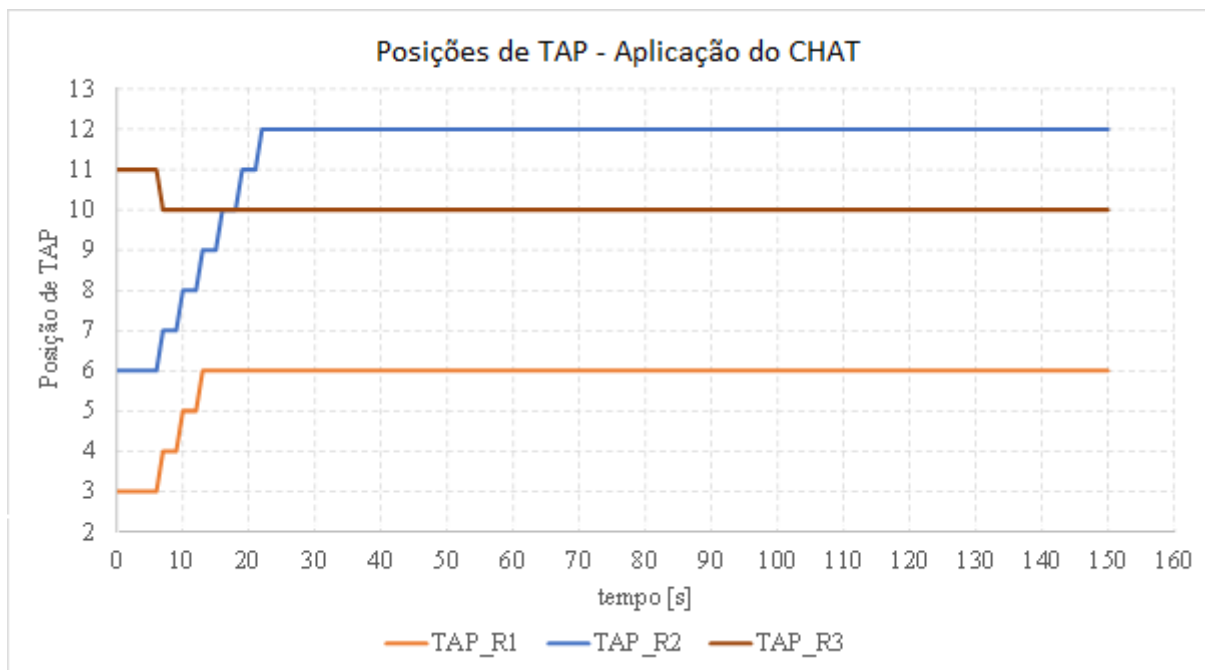


Figura 5.18 - Comutações de TAP com aplicação do CHAT – Cenário 3

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.19 apresenta a variação de tensão nos reguladores, onde é possível notar que, com a aplicação do CHAT, o uso da temporização inversa não apresentou a elevação desnecessária de tensão.

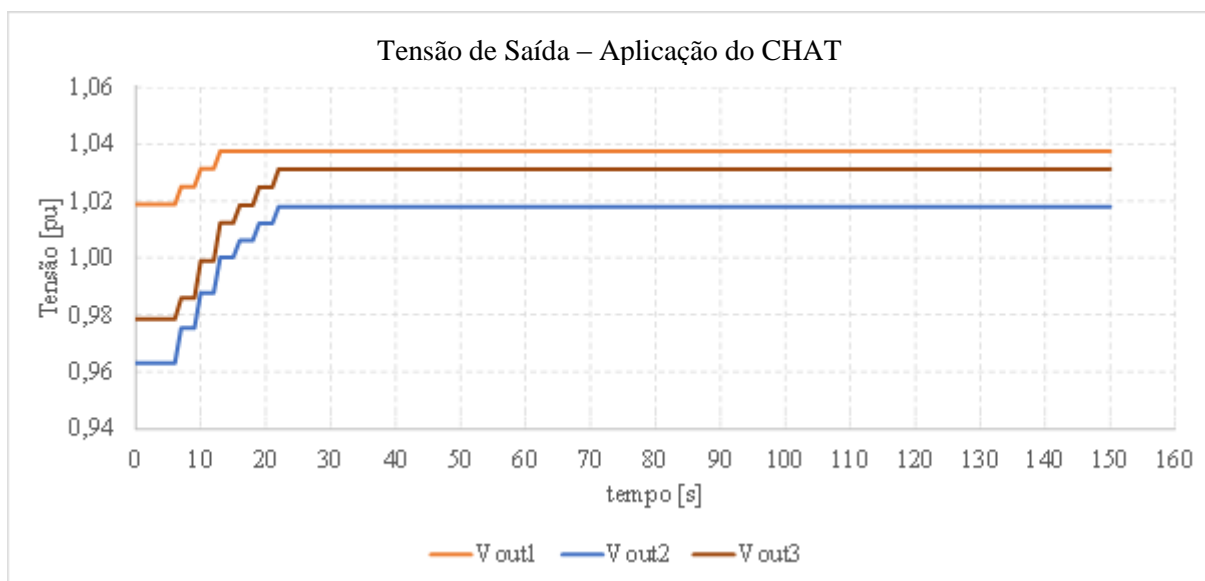


Figura 5.19 - Tensão de Saída com aplicação do CHAT – Cenário 3

Fonte: Elaborado pelo autor.

O comparativo entre os índices de severidade dos reguladores de tensão, apresentado na Figura 5.20, permite verificar os benefícios da aplicação do CHAT associado a temporização inversa, com um destaque para o regulador R3 que havia, na operação convencional, apresentado uma segunda área de transgressão com tensões elevadas, a qual foi completamente eliminada.

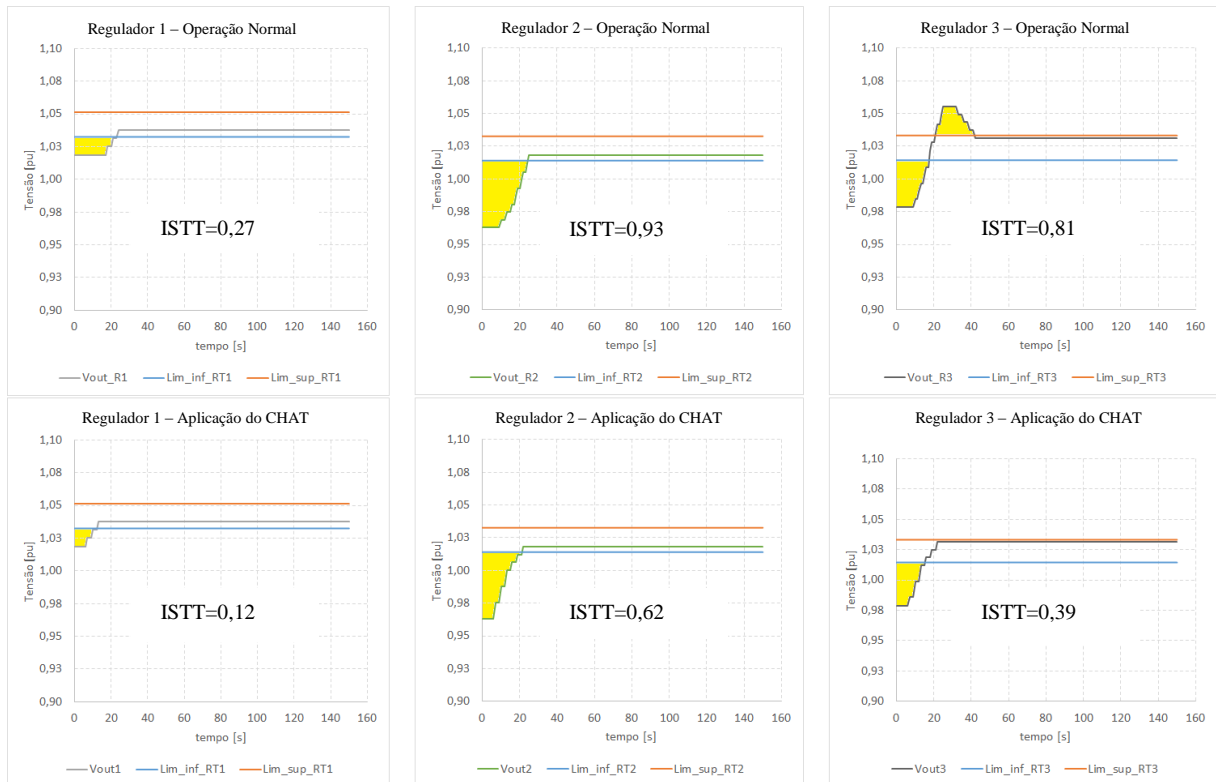


Figura 5.20 - Tensão de saída e índice de severidade – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que em operação normal o número de comutações com o uso da temporização inversa foi significativamente maior do que com uso de temporização linear em horários de maior queda de tensão, no entanto a aplicação do CHAT permitiu aproveitar o benefício do uso tempo inverso, antecipando a regularização sem a quantidade elevada de comutações.

A fim de verificar os efeitos da temporização inversa em um horário de menor variação dos níveis de tensão, foi também realizada a simulação na transição entre o patamar da 15 h para as 16 h. Como pode ser visto na Figura 5.21, o efeito da aplicação de temporização inversa nos reguladores R2 e R3 resultou em um início de comutação quase que simultâneo em ambos os reguladores.

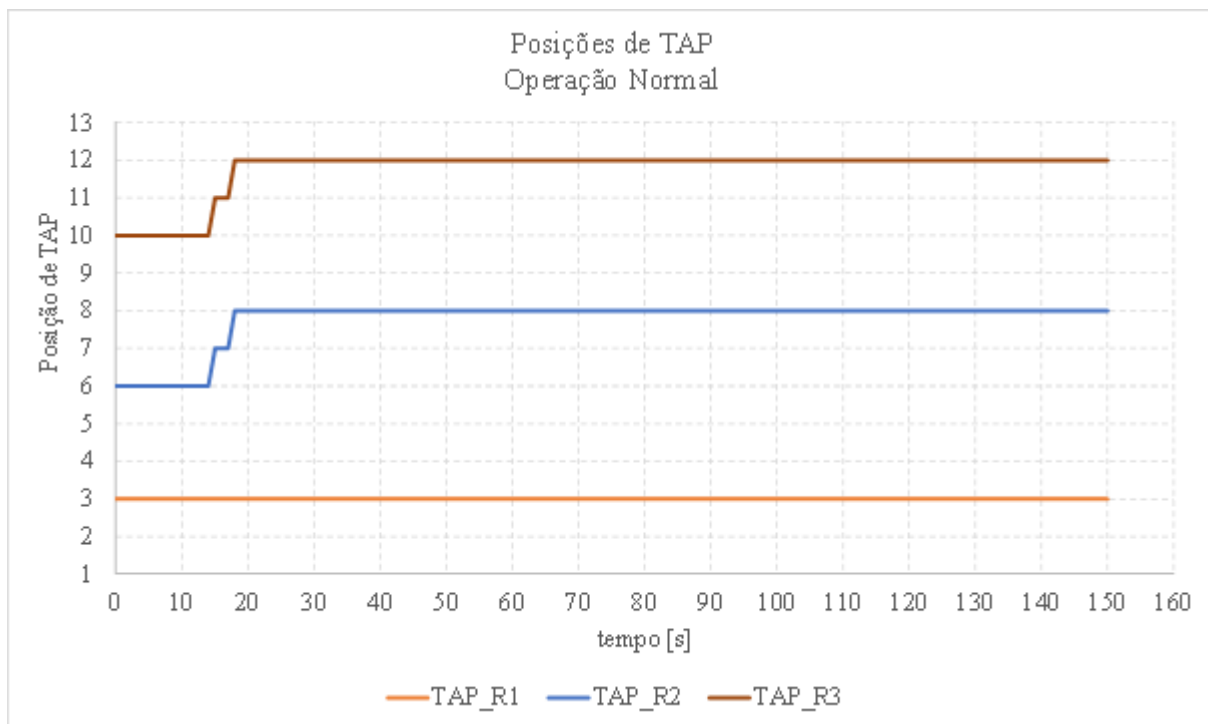


Figura 5.21 - Comutações de TAP em Operação Normal – Cenário 3 – 15 h – 16 h

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa resposta dos equipamentos, neste caso, resultou na rápida regularização de tensão sem a ocorrência de comutações desnecessárias, como pode ser visto na Figura 5.22.

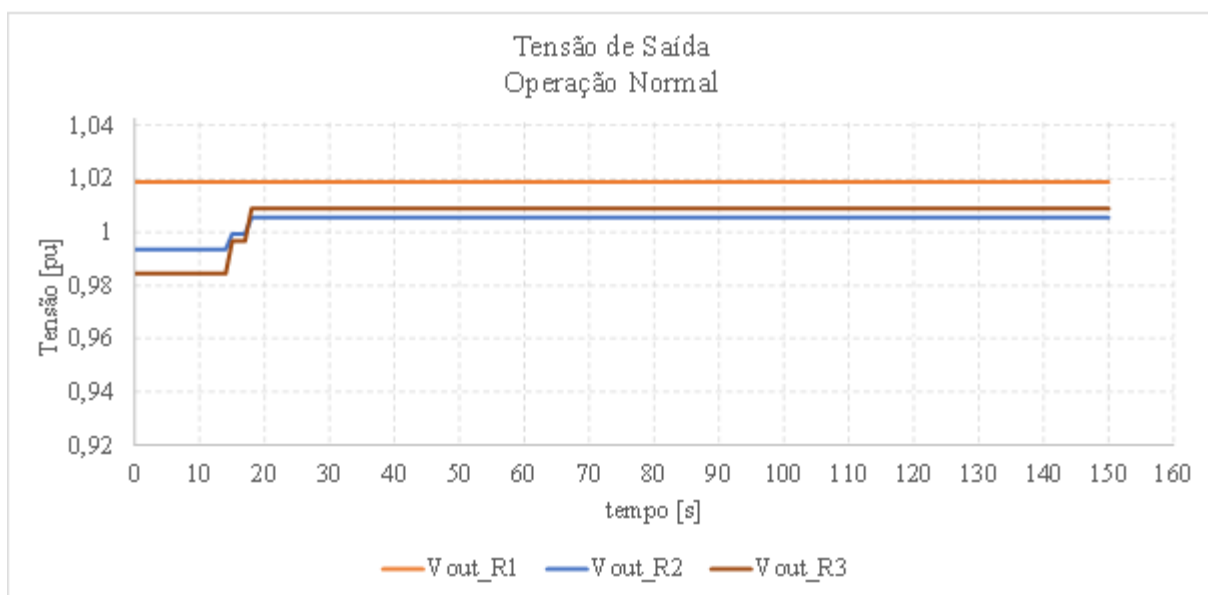


Figura 5.22 - Tensão de Saída em Operação Normal – Cenário 3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a utilização do sistema hierárquico, verifica-se resultados similares aos da aplicação da temporização inversa, uma vez que os tempos empregados são relativamente baixos. Nota-se na Figura 5.23 que, neste cenário, foi mantido o mesmo número de comutações, cujo início foi muito próximo ao da aplicação de tempo inverso em operação normal.

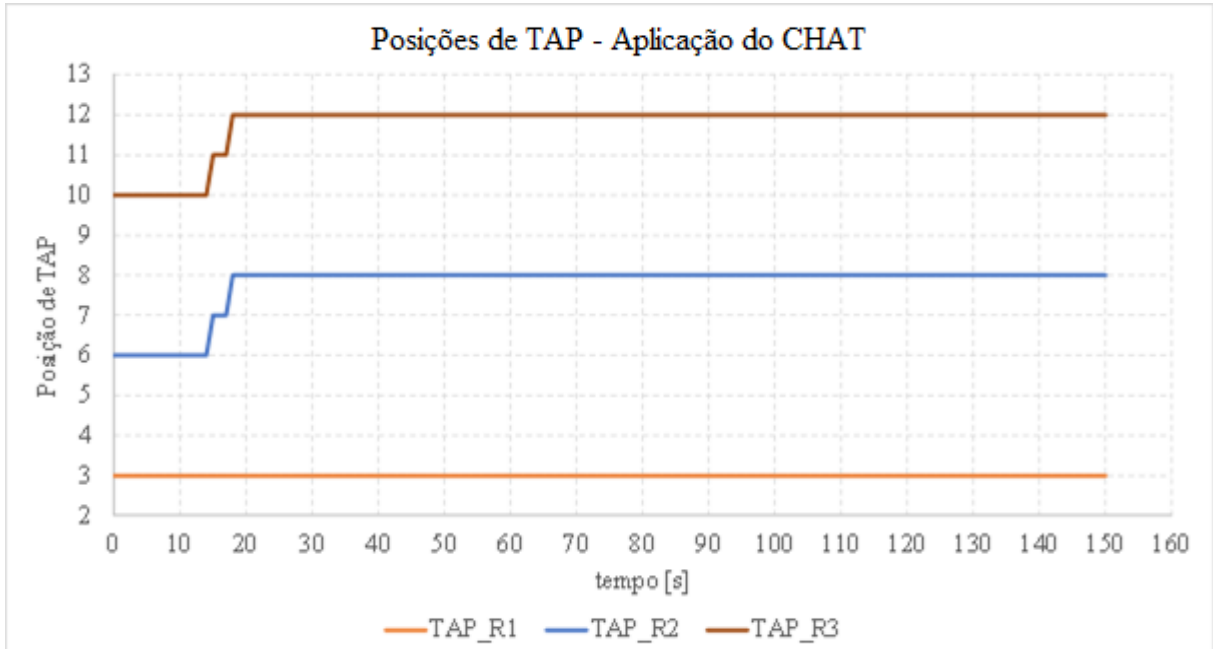


Figura 5.23 - Comutações de TAP com aplicação do CHAT – Cenário 3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a tensão de saída, apresentada na Figura 5.24, verifica-se que a regularização ocorre de forma rápida, equivalente ao resultado obtido com a temporização inversa.

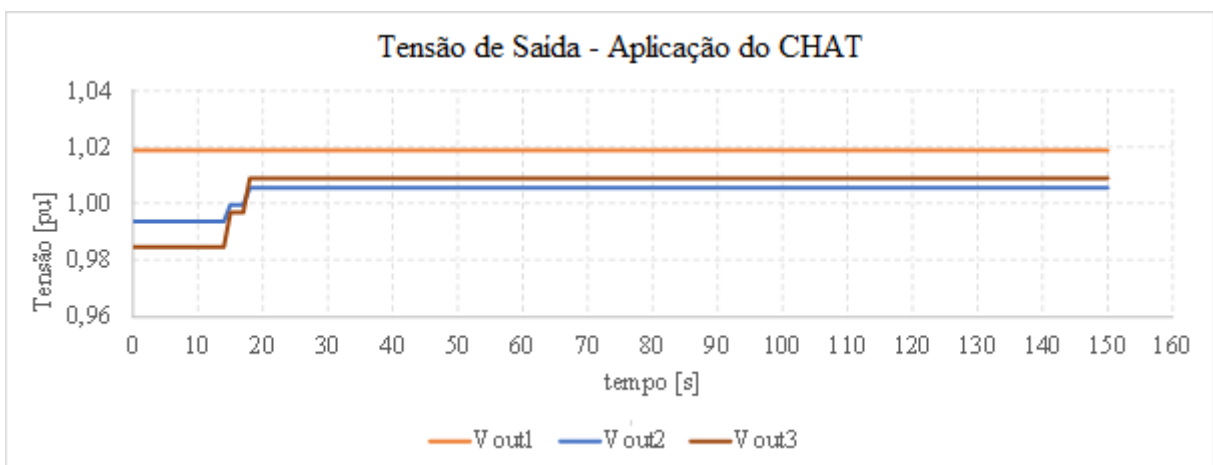


Figura 5.24 - Tensão de Saída com aplicação do CHAT – Cenário 3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se neste patamar que os resultados um resultado equivalente também no índice de severidade, dada a pequena quantidade de comutações necessária e que os tempos de operação dos reguladores utilizando a TI foram muito próximos tanto em operação normal como utilizando o CHAT. A Figura 5.25 apresenta este comparativo.



Figura 5.25 - Tensão de saída e índice de severidade – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste caso a resposta da temporização inversa foi muito semelhante ao resultado obtido com o emprego do CHAT, mantendo um relativamente baixo número de comutações em ambos os cenários e sem impactos significativos nas transgressões de tensão.

5.5 Cenário 4 – Sistema Reconfigurado

A fim de apresentar os benefícios da aplicação do CHAT na reconfiguração de sistemas, foi constituído o cenário 4, apresentado anteriormente na Figura 5.4, no qual o bloco de cargas do AL2, atendido pelo regulador R6, foi transferido para o AL1. Essa configuração, altera o conjunto de ajustes e a topologia da rede, adicionando mais um regulador de tensão no AL1.

Neste cenário, as simulações foram realizadas mantendo os ajustes de todos os reguladores de tensão, simulando o efeito das transições entre os patamares horários sem a adequação dos reguladores aos novos valores de carregamento e tensão. Mantendo a análise para a transição entre os patamares das 19 h e 20 h, nota-se que as violações de tensão para os reguladores aumentaram consideravelmente mesmo com a aplicação do CHAT, como pode ser visto na Figura 5.26.

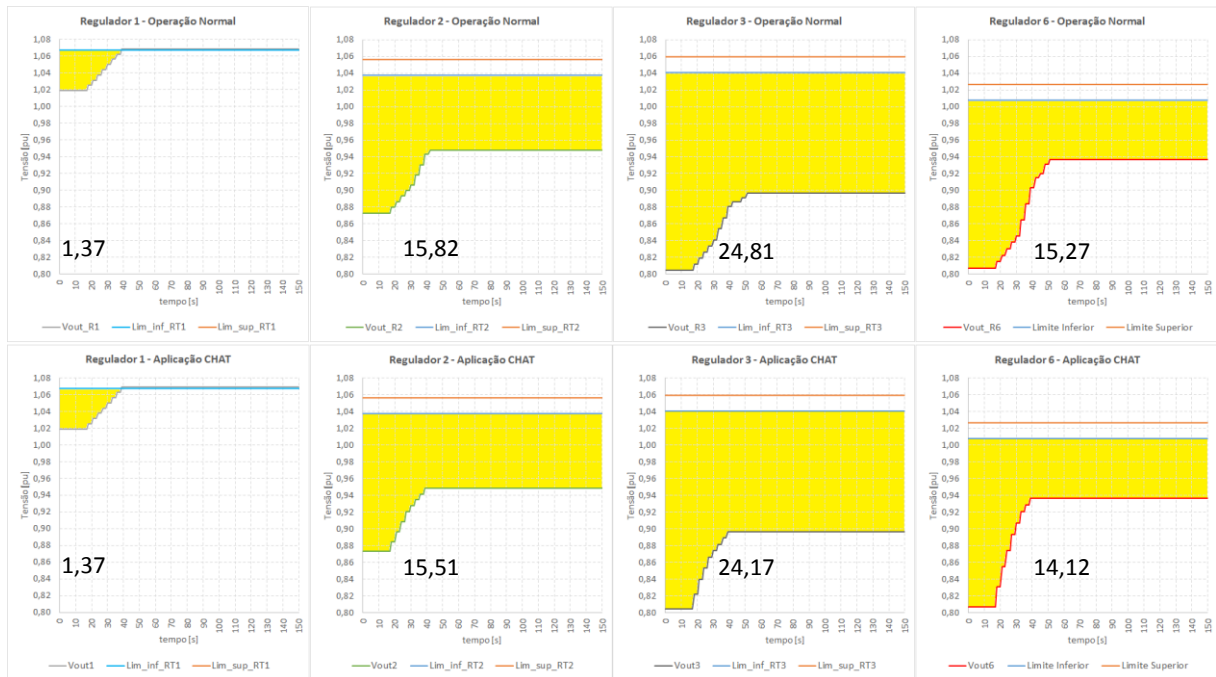


Figura 5.26 – Tensão de saída e índice de severidade – transição entre o patamar das 19 h e 20 h – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 4

Fonte: Elaborado pelo autor

Essa transgressão se deve ao significativo aumento da carga neste horário, o que evidencia o fato de que a manobra neste horário não é recomendada, exceto em casos de contingência. Neste caso o controle possibilita acelerar o processo, porém pelas limitações do sistema elétrico não é possível regularizar a tensão. Por outro lado, ao executar a manobra de reconfiguração fora do horário de ponta, são obtidos resultados satisfatórios. Avaliando a transferência de cargas entre os patamares das 15h e 16 h, obtém-se uma redução significativa redução no tempo de regularização e no ISTT, conforme pode ser visto na Figura 5.27.

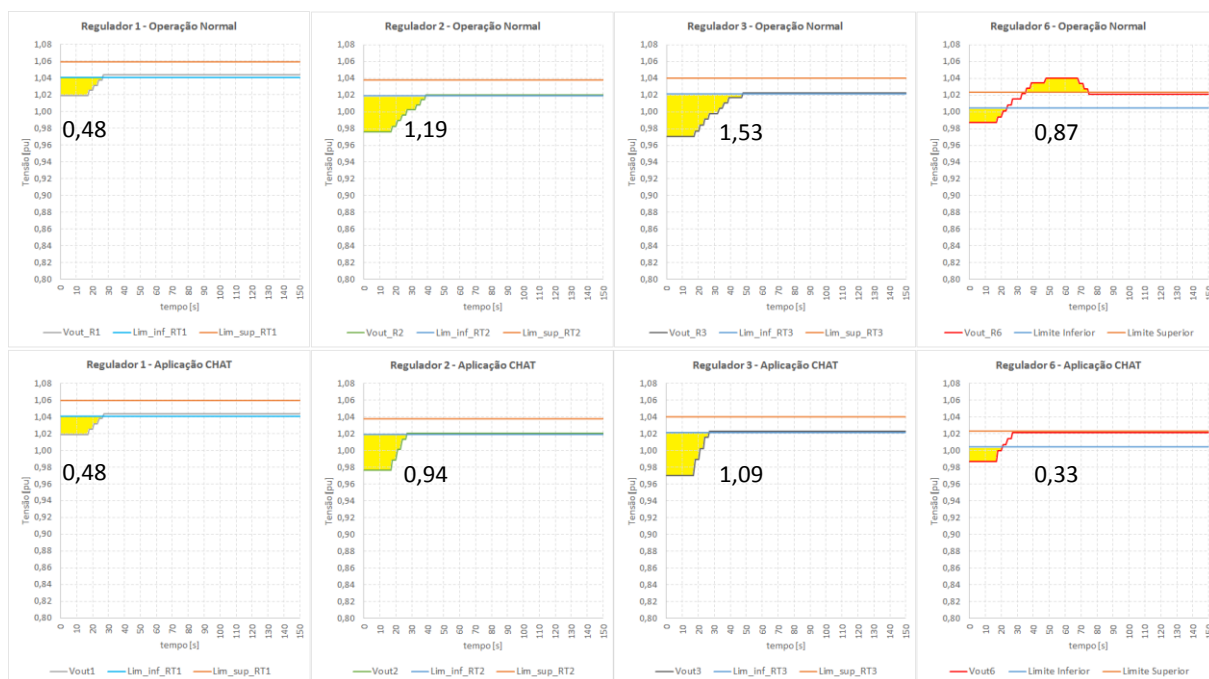


Figura 5.27 – Tensão de saída e índice de severidade – transição entre o patamar das 15 h e 16 h – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 4

Fonte: Elaborada pelo autor.

Mesmo com a existência de horários cuja manobra não é recomendada, devido à possibilidade de situações de contingências, foram realizadas simulações para todos os 24 patamares de carga, cujos resultados obtidos com e sem a aplicação do CHAT são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Número de Comutações e Severidade das Transgressões

	Indicador	RT1	RT2	RT3	RT6
Operação Normal	Número de Comutações	109	47	23	94
	Índice de Severidade[pu·s]	14,587	72,482	118,374	83,128
	Regularização da Tensão [s]	42	60	72	111
CHAT	Número de Comutações	109	47	24	67
	Índice de Severidade [pu·s]	14,587	68,779	110,272	77,067
	Regularização da Tensão [s]	42	45	45	51

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 Cenário 5 – Sistema Reconfigurado e Novos Ajustes

Dada a operação nas 24 horas, devido ao considerável aumento de carga no horário de ponta, em um segundo momento, os ajustes dos reguladores do AL1 foram adequados à nova configuração, através da atuação do controle individual de cada regulador. A temporização também foi recalculada devido a reconfiguração, de acordo com a nova matriz hierárquica. Esses ajustes podem ser vistos na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Ajustes dos reguladores de tensão

	AL1				AL2	
	RT1	RT2	RT3	RT6	RT4	RT5
I_{Nominal} [A]	200	200	200	200	200	200
V_{Ref} [pu]	1,009	1	1	1	1,009	1
U_R [pu]	0,035	0,026	0,035	0,113	0,078	0,061
U_X [pu]	0,026	0,017	0,026	0,061	0,052	0,035
Ins [pu]	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
Load Bonus	1	1	1	1	1	1
TAP Limite	16	16	16	16	16	16
t₁ [s]	15	30	45	60	15	30
t₂ [s]	0	0	0	0	0	0
t_{Com} [s]	3	3	3	3	3	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida é aplicada a estratégia de controle centralizado, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Número de Comutações e Severidade das Transgressões

	Indicador	RT1	RT2	RT3	RT6
Operação Normal	Número de Comutações	17	64	24	44
	Índice de Severidade	2,704	72,149	120,548	102,055
	Regularização da Tensão	24	60	66	123
CHAT	Número de Comutações	17	64	24	38
	Índice de Severidade	2,704	67,228	111,644	89,582
	Regularização da Tensão	24	45	39	63

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que, em ambos os casos, os níveis de severidade foram reduzidos com a aplicação do CHAT, bem como o número de comutações.

5.7 Cenário 6 – Sistema com RT2 sem CHAT

A fim de verificar os impactos da aplicação do CHAT em uma parte do sistema, neste cenário foi considerada a operação de do regulador RT2 sem comunicação com o sistema centralizado. A Figura 5.28 apresenta o processo de comutação dos reguladores enquanto que na Figura 5.29 verifica-se a variação das tensões, com os equipamentos em operação normal na transição entre o patamar das 19 h para o das 20 h

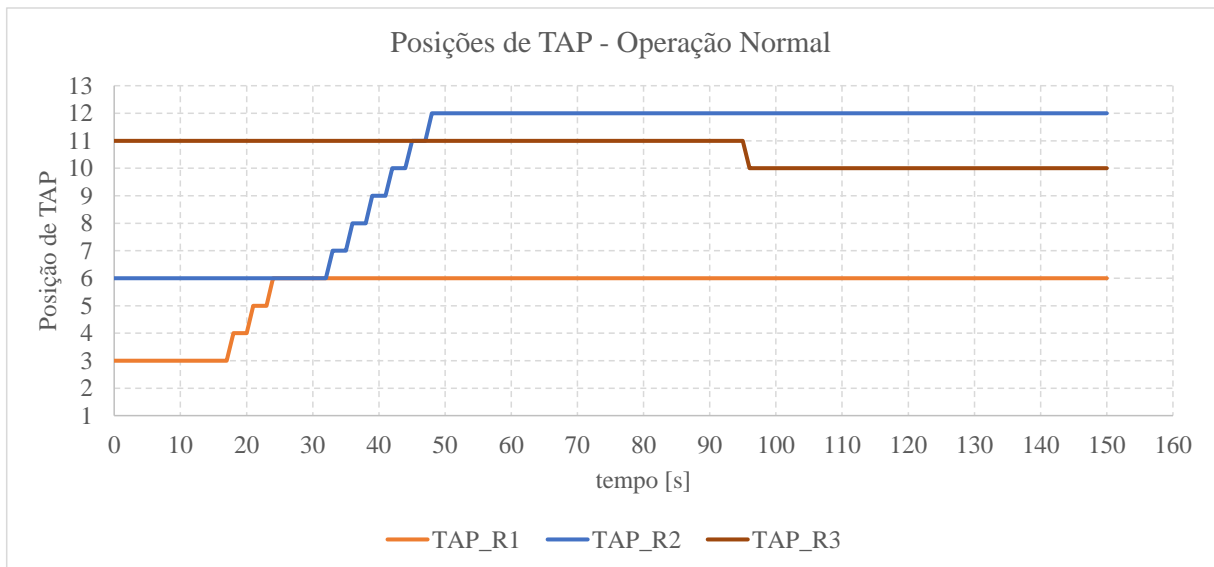


Figura 5.28 - Comutações de TAP em Operação Normal – Cenário 6

Fonte: Elaborado pelo autor.

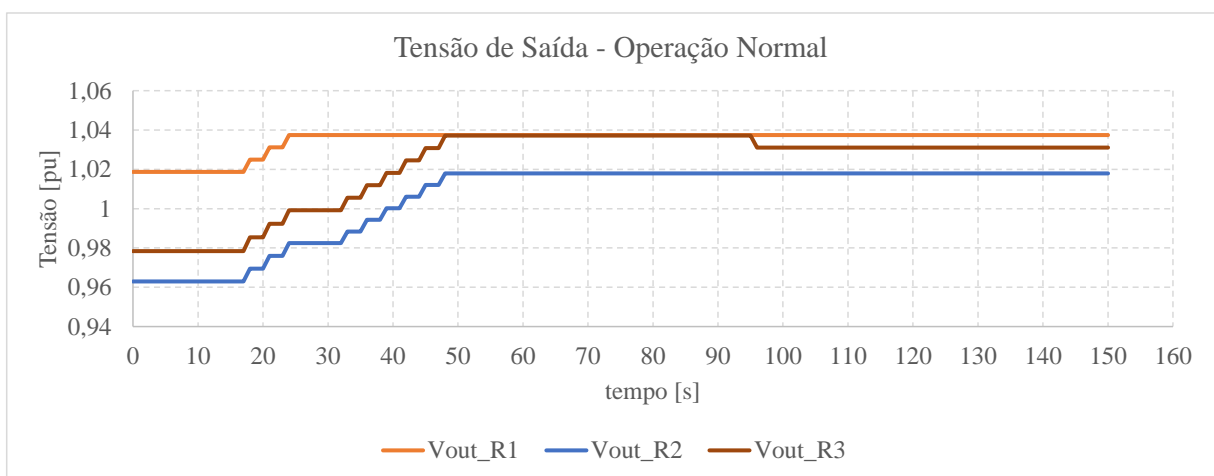


Figura 5.29 - Tensão de Saída em Operação Normal – Cenário 6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que nesta forma operando, não ocorre a limitação de posições de TAP, nem a alteração da temporização em tempo real em RT2. Assim, considerando a utilização do sistema hierárquico, nota-se um comportamento similar a operação sem CHAT devido ao elevado número de comutações necessárias no segundo regulador. Como pode-se verificar na Figura 5.30, uma pequena melhoria foi obtida pela antecipação das operações de RT3.

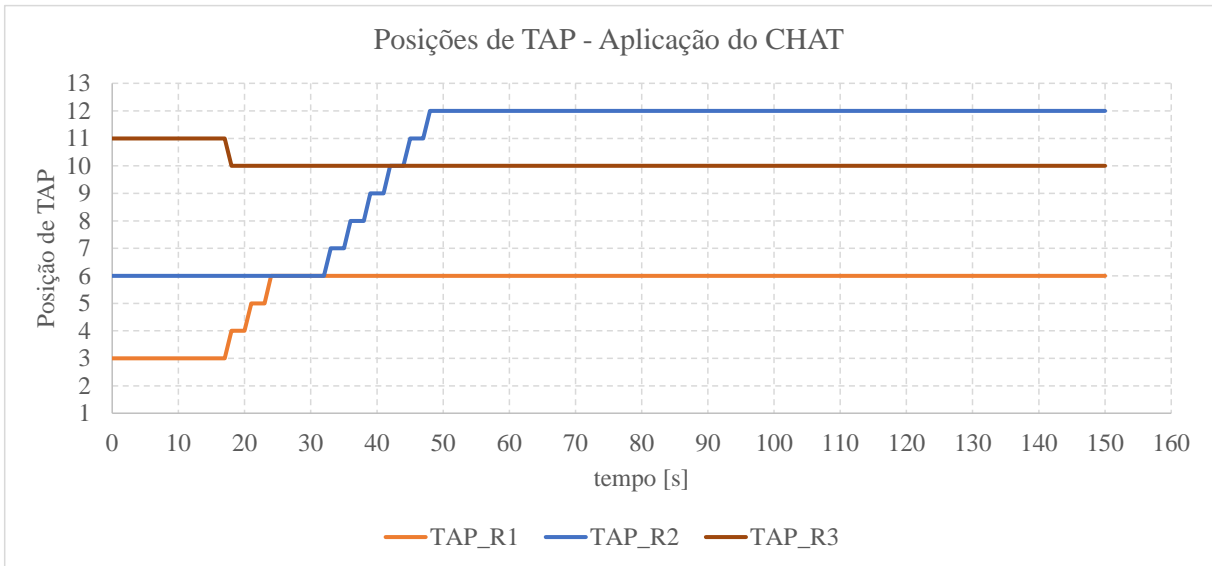


Figura 5.30 - Comutações de TAP com aplicação do CHAT – Cenário 6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os níveis de tensão, como se verifica na Figura 5.31, a melhoria é percebida apenas no terceiro regulador.

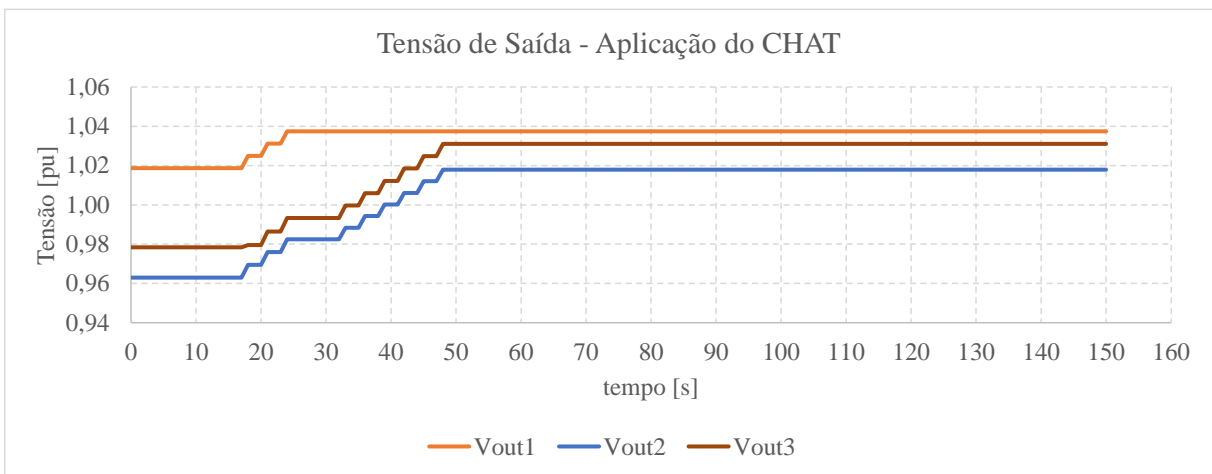


Figura 5.31 - Tensão de Saída com aplicação do CHAT – Cenário 6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando o ISTT obtido com a aplicação do CHAT em relação aos valores obtidos para o índice em operação normal nota-se, conforme apresentado na Figura 5.15, uma redução das áreas de transgressão com o uso do controle centralizado.

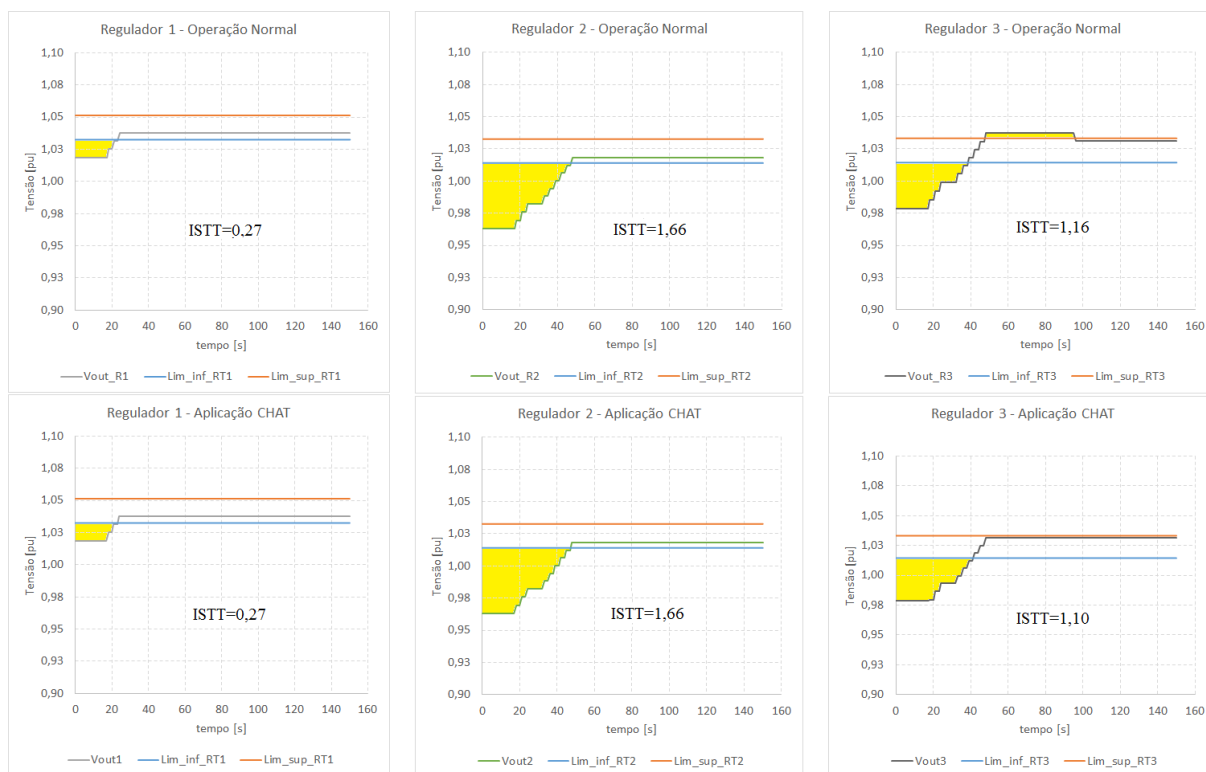


Figura 5.32 - Tensão de saída e índice de severidade – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 6

Fonte: Elaborado pelo autor.

O bloqueio da supervisão e a falta de comunicação do segundo regulador com o controle centralizado reduz os benefícios da metodologia, em especial pela forte influência deste regulador na adequação das tensões do AL.

5.8 Cenário 7 – Sistema com RT3 sem CHAT

Complementando a avaliação do cenário anterior, para este cenário foi considerada a operação de do regulador RT3 sem comunicação com o sistema centralizado. As comutações dos reguladores são apresentadas na Figura 5.33. A verificação da variação das tensões pode ser vista na Figura 5.34. Ambas as figuras representam a transição entre o patamar das 19 h para o das 20 h, com os equipamentos em operação normal.

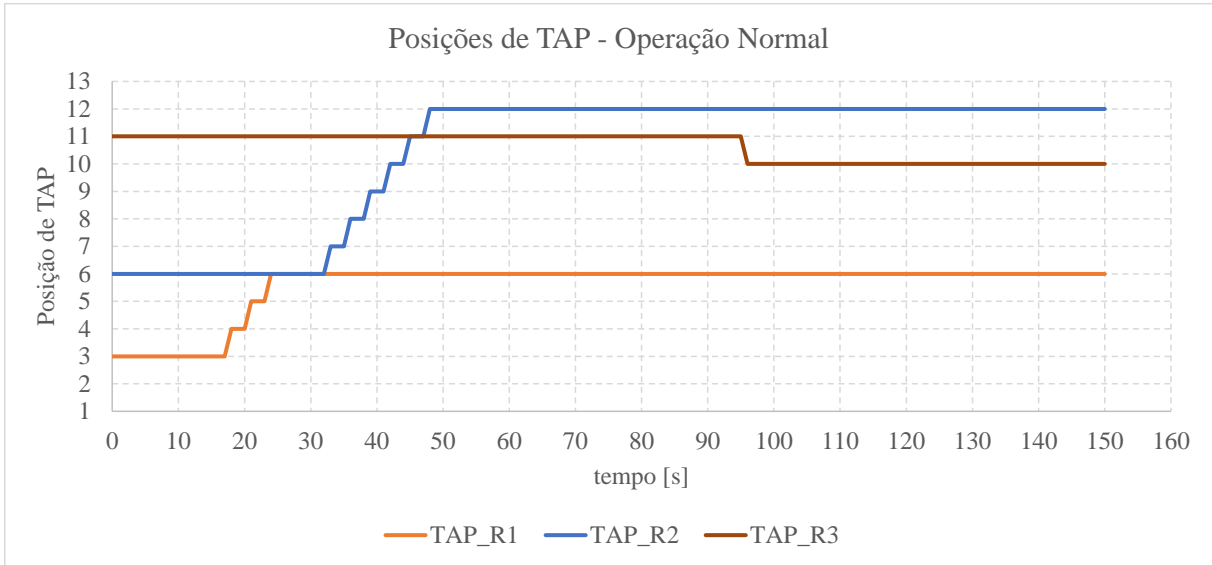


Figura 5.33 - Comutações de TAP em Operação Normal – Cenário 7

Fonte: Elaborado pelo autor.

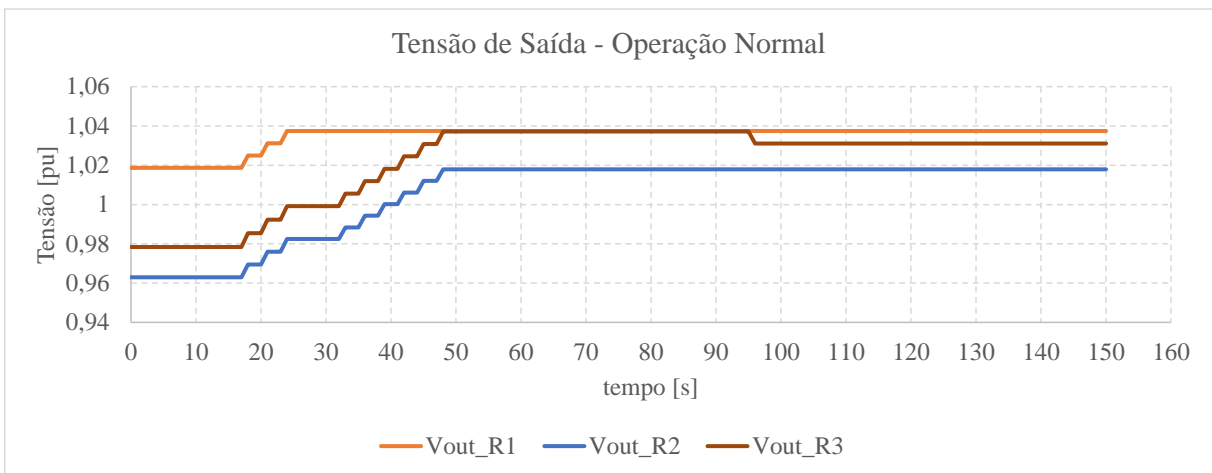


Figura 5.34 - Tensão de Saída em Operação Normal – Cenário 7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que nesta forma operando, não ocorre a limitação de posições de TAP, nem a alteração da temporização em tempo real em RT2. Assim, considerando a utilização do sistema hierárquico, nota-se um comportamento similar a operação sem CHAT devido ao elevado número de comutações necessárias no segundo regulador. Como pode-se verificar na Figura 5.35, uma pequena melhoria foi obtida pela antecipação das operações de RT3.

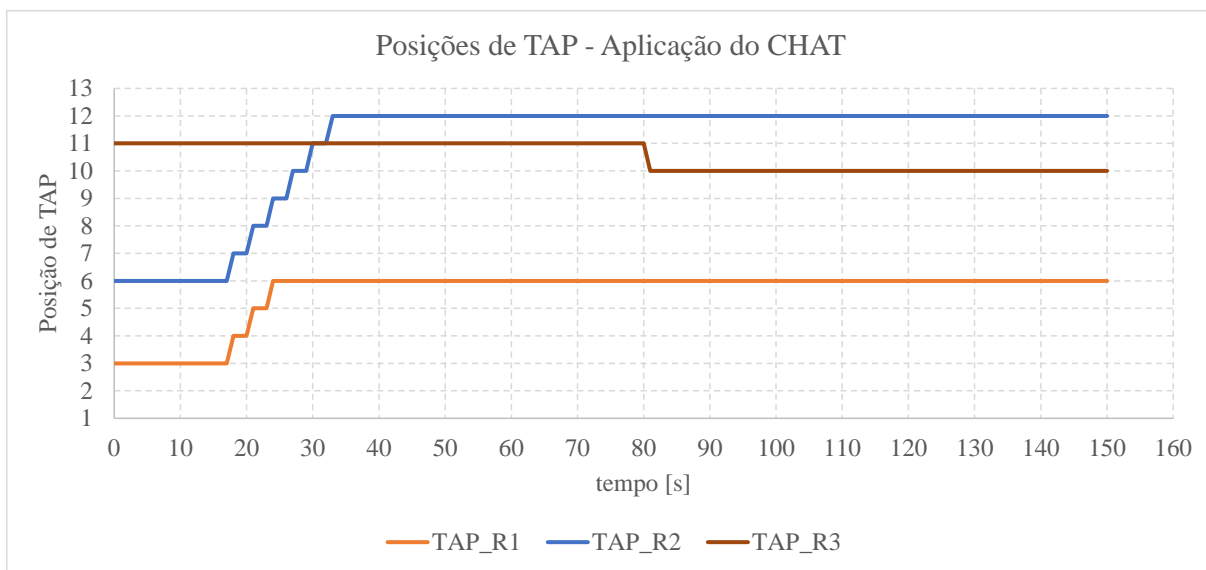


Figura 5.35 - Comutações de TAP com aplicação do CHAT – Cenário 7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os níveis de tensão, como se verifica na Figura 5.36, a melhoria é percebida apenas no terceiro regulador.

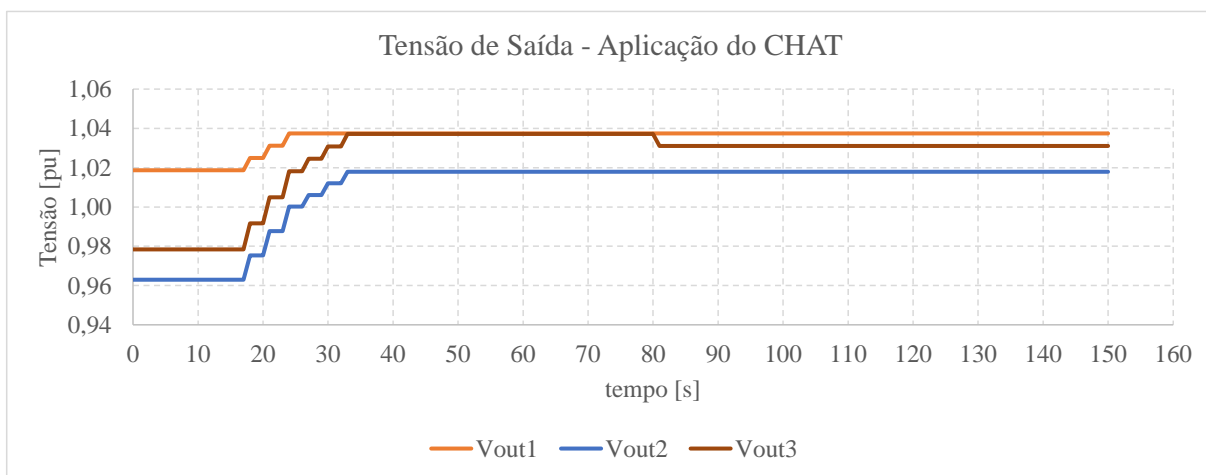


Figura 5.36 - Tensão de Saída com aplicação do CHAT – Cenário 7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando o ISTT obtido com a aplicação do CHAT em relação aos valores obtidos para o índice em operação normal nota-se, conforme apresentado na Figura 5.37, uma redução das áreas de transgressão com o uso do controle centralizado.

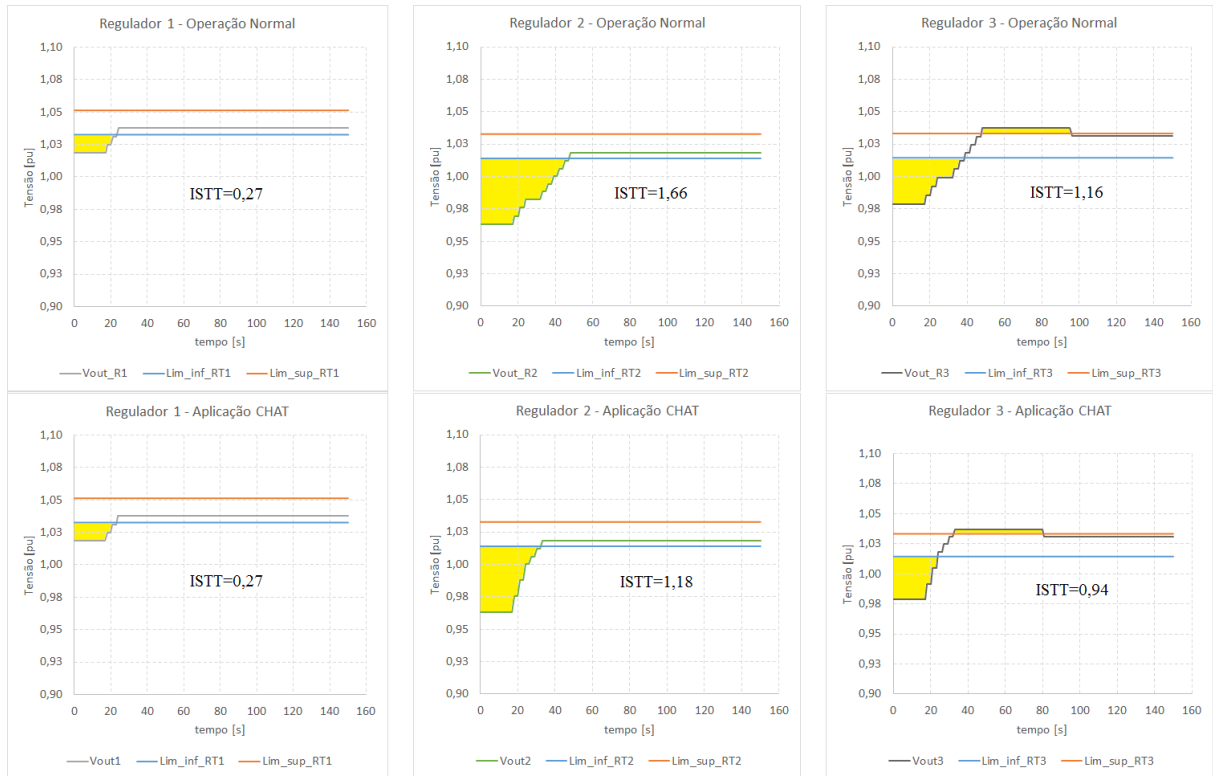


Figura 5.37 - Tensão de saída e índice de severidade – Operação Normal x Aplicação do CHAT – Cenário 7

Fonte: Elaborado pelo autor.

O bloqueio da supervisão e a falta de comunicação do segundo regulador com o controle centralizado reduz os benefícios da metodologia, em especial pela forte influência deste regulador na adequação das tensões do AL.

5.9 Considerações finais

No Capítulo 5 foram apresentados os resultados da aplicação da metodologia em um sistema teste, demonstrando a iteração existente entre os reguladores de tensão e os benefícios obtidos com o CHAT. Foram também apresentados cenários com o bloqueio de um dos reguladores, nos quais os efeitos do controle centralizado foram reduzidos quando comparados com a aplicação plena da proposta. Com base nos casos apresentados fica evidente a margem para a coordenação entre os reguladores em termos de número de comutações e o desenvolvimento de novas funcionalidades e a aplicação da automação e supervisão dos

equipamentos destinados a regulação de tensão no cenário de redes inteligentes totalmente justificado.

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O presente capítulo apresenta uma análise dos resultados obtidos com a aplicação do método CHAT desenvolvido nesta tese, considerando os diferentes cenários avaliados no Capítulo 5. Em um primeiro momento é realizada uma avaliação da operação convencional dos reguladores de tensão, comparando a aplicação de temporização linear (TL), a temporização inversa (TI) e o uso de operação não sequencial. A seguir os resultados obtidos com o uso do CHAT no sistema teste. E por fim um comparativo entre operação convencional e a operação considerando a aplicação do CHAT.

Analisando o comportamento dos reguladores de tensão na transição entre os 24 patamares, exibidos na Figura 6.1, pode-se verificar um aumento de 26,72% na quantidade de comutações com a aplicação da temporização inversa, passando de 116 para 147 comutações no período. Esse aumento foi mais significativo nos patamares das 19 h e 20h onde o aumento foi da ordem de 68,8%. Isso ocorre devido à maior variação de tensão entre esses patamares que resulta em uma resposta mais rápida nos equipamentos que utilizam a TI. Nos demais horários a quantidade de comutações foi semelhante para ambos os modos de operação. O uso das operações não-sequenciais não apresentou variação na quantidade de comutações.

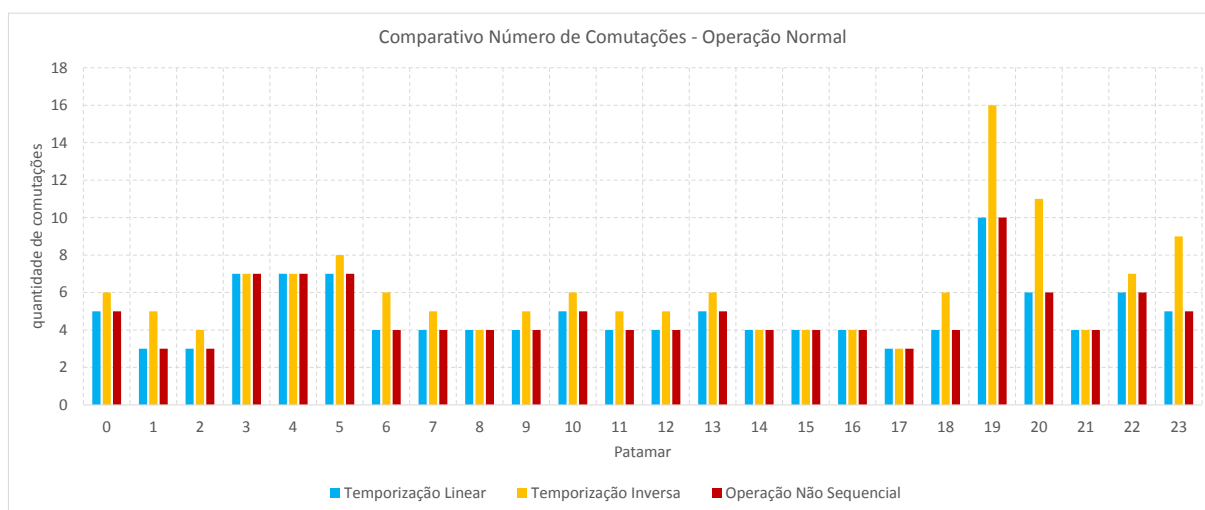


Figura 6.1 – Número de comutações em operação convencional.

Fonte: Elaborado pelo autor

Por outro lado, avaliando o índice de severidade das transgressões de tensão, é possível identificar uma redução no índice com o uso de temporização inversa. Na Figura 6.2, nota-se

uma violação maior da TI nos patamares das 19 h e 20 h, porém a violação é maior para todos os patamares tanto com o uso de temporização linear como utilizando a operação não sequencial. Avaliando a operação convencional, o uso de temporização inversa representou uma redução de 47,17% no ISTT enquanto que a aplicação de operações não sequenciais aumentou o índice em 2,5%.

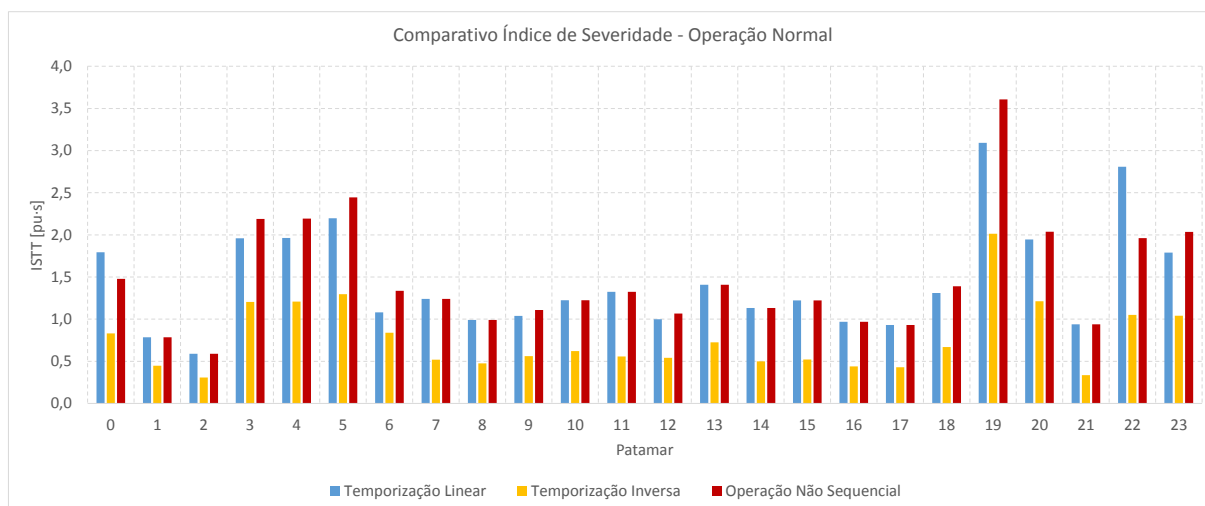


Figura 6.2 – ISTT em operação convencional.

Fonte: Elaborado pelo autor

Um destaque para o horário mais crítico das 19 h, no regulador RT3, apresentado na Figura 6.3, mostra o comportamento das tensões e posições de TAP para cada tipo de temporização. Nota-se existência de uma segunda área de transgressão em todos os casos, porém para a temporização inversa o apresentou um aspecto negativo de ter uma amplitude da transgressão maior e que pode resultar em sobretensão. Esse fato que resulta em operações adicionais para reduzir a tensão enquanto RT2 e RT1 completam as comutações.

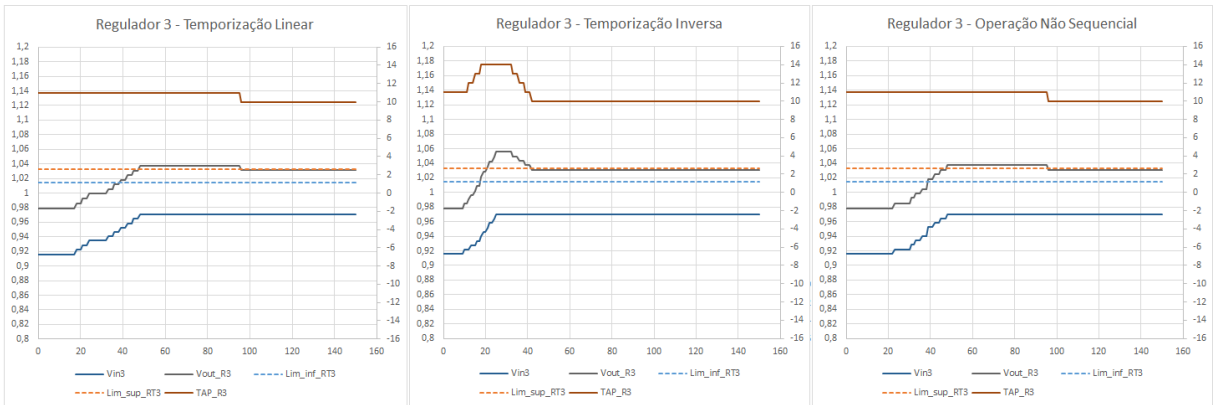


Figura 6.3 – Horário de ponta com aplicação de TI

Fonte: Elaborado pelo autor

O tempo de regularização da tensão, visto na Figura 6.4, apresenta um comportamento similar ao do ISTT. Como esperado para este indicador, a melhor resposta foi obtida utilizando a temporização inversa em todos os patamares, sendo em média 50,71% mais rápida. Para o modo de operação não sequencial e para a temporização linear a resposta para o alimentador foi equivalente.

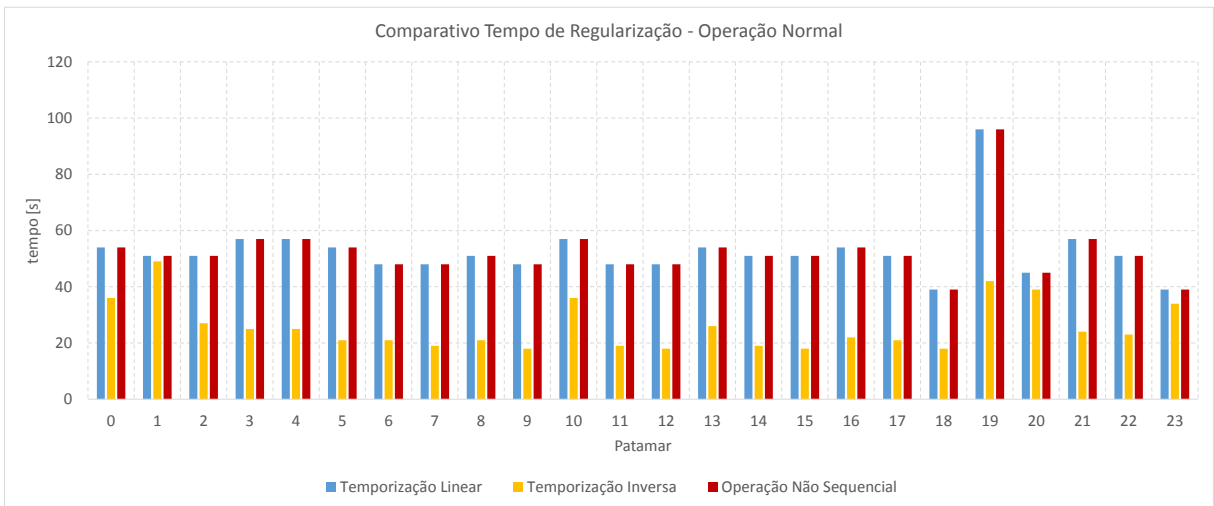


Figura 6.4 – Tempo de regularização da tensão em operação convencional.

Fonte: Elaborado pelo autor

Esta análise representa uma avaliação dos reguladores sem uma estratégia de controle centralizado. Com o uso dos diferentes tipos de temporização, no comparativo apresentado,

pode-se perceber o benefício da temporização inversa em termos de uma resposta rápida pode ser prejudicado pelo aumento no número de comutações dos reguladores e em alguns momentos pode também resultar em tensões elevadas, reforçando a importância de um controle coordenado bem como a aplicação de uma estratégia de controle centralizado para os níveis de tensão. Assim, na sequência de análises serão apresentadas as mesmas avaliações do método CHAT e após será comparado com a utilização da metodologia convencional.

O número de comutações necessárias com a aplicação do CHAT apresentou um comportamento similar ao método convencional, tendo um aumento no número de comutações com o uso da temporização inversa, como pode ser visto na Figura 6.5.

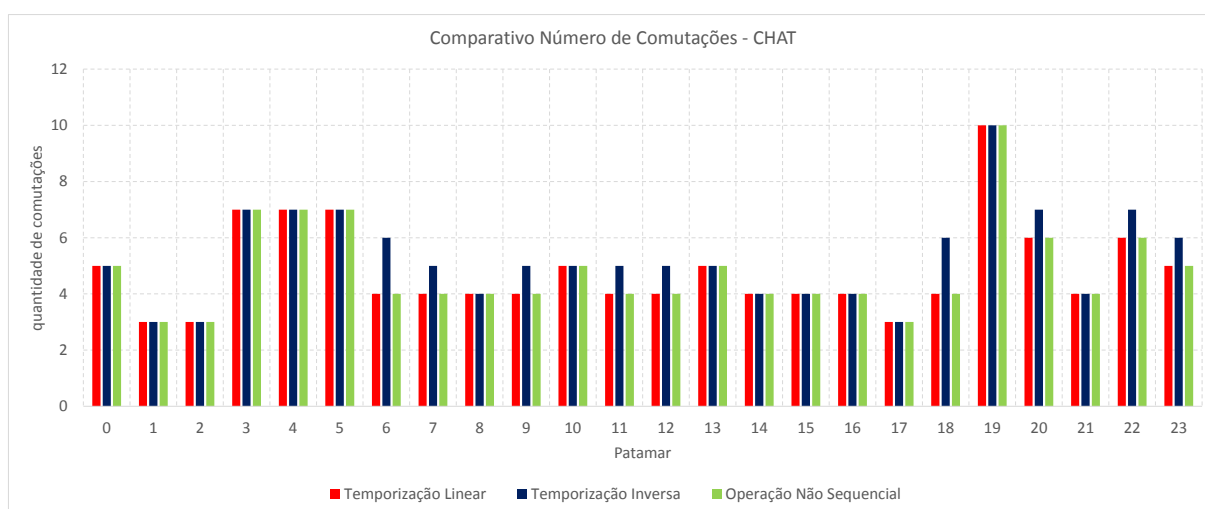


Figura 6.5 – Número de comutações – Aplicação do CHAT.

Fonte: Elaborado pelo autor

Esse aumento foi menos significativo, na ordem de 9,48%, passando de 116 para 127 comutações no período. A avaliação do índice de severidade, mostrada na Figura 6.6, sugere a que a combinação de temporização inversa e CHAT são mais eficientes pois na maioria dos patamares houve redução das áreas de transgressão totalizando uma redução de 22,76% do ISTT. Já a aplicação de operações não sequenciais foi prejudicial nesse aspecto pois gerou um aumento de 9,39% no índice. Esse resultado se deve a resposta mais lenta do regulador RT1 no qual foi introduzido o tempo entre as comutações.

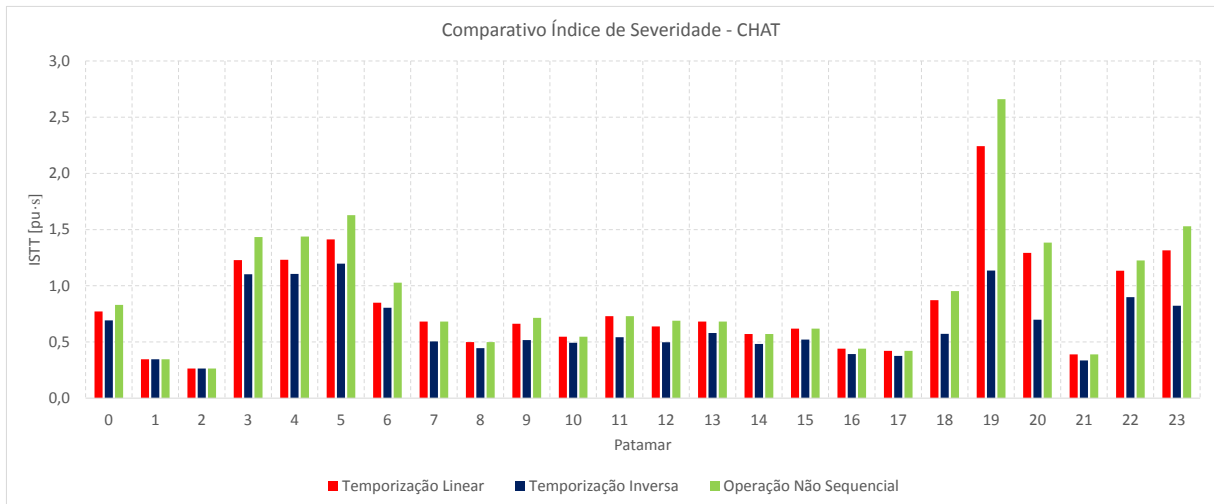


Figura 6.6 – ISTT – Aplicação do CHAT.

Fonte: Elaborado pelo autor

Com o tempo de regularização o resultado foi bastante semelhante ao índice de severidade, tendo novamente a combinação de temporização inversa e CHAT a melhor resposta, como pode ser visto na Figura 6.7, reduzindo em 14,76% o tempo de regularização. O uso das operações não sequenciais resultou em um aumento de 7,29% nesse tempo.

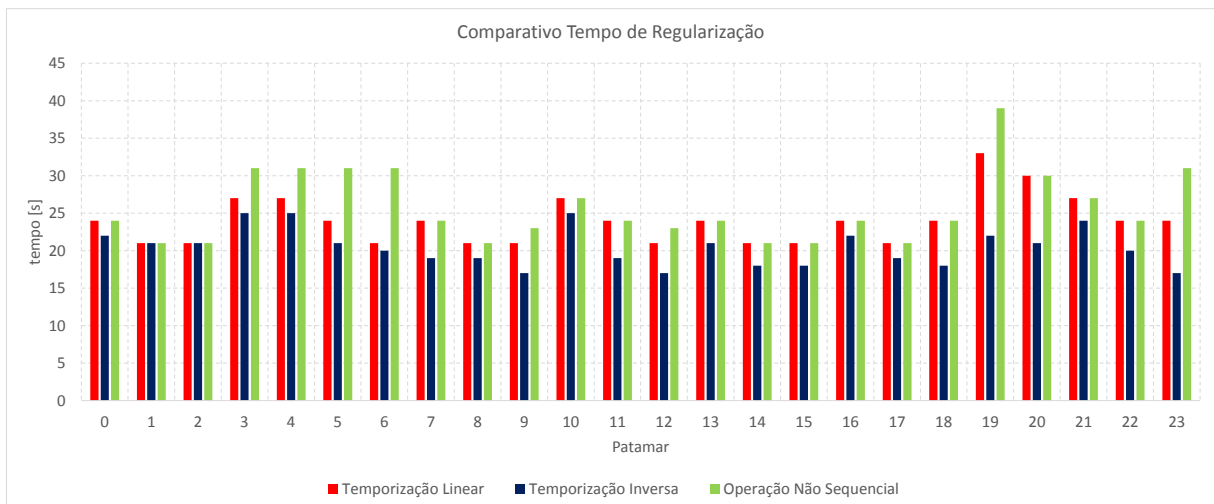


Figura 6.7 – Tempo de Regularização da Tensão – Aplicação do CHAT.

Fonte: Elaborado pelo autor

O comparativo entre o uso da metodologia convencional e do CHAT, na mesma base de temporização permite visualizar os benefícios da aplicação do método desenvolvido. Na

Figura 6.8. Para o alimentador estudado, a aplicação do CHAT manteve o mesmo número de comutações quanto utilizada temporização linear e operação não sequencial, no entanto houve uma redução na quantidade de comutações de 13,61% no uso da temporização inversa.

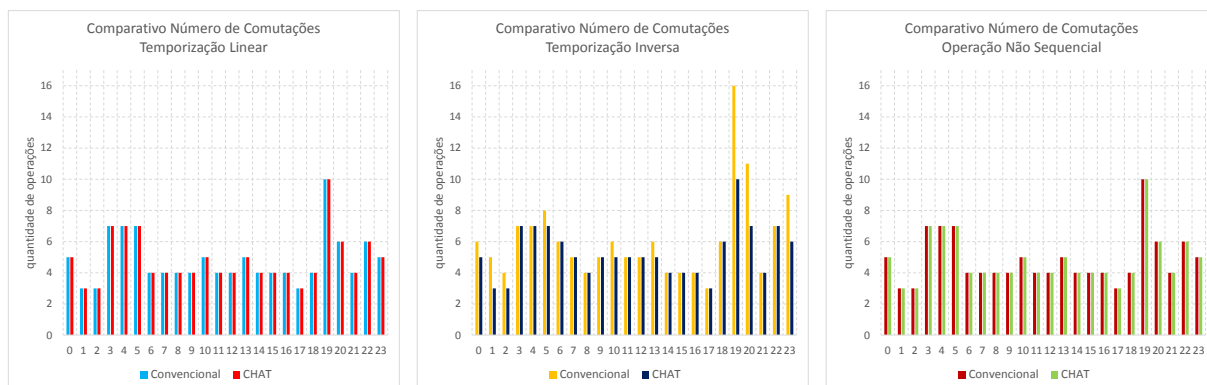


Figura 6.8 – Número de Comutações – Comparativo método convencional e CHAT.

Fonte: Elaborado pelo autor

Quando comparado o ISTT, verifica-se o benefício do uso do CHAT em todos os modos de operação, como pode ser visto na Figura 6.9. Avaliando a temporização linear, o uso do CHAT reduziu a área de transgressão em 42,88%. Com a temporização inversa a redução foi de 16,48% e com a operação não sequencial foi de 39,04%.

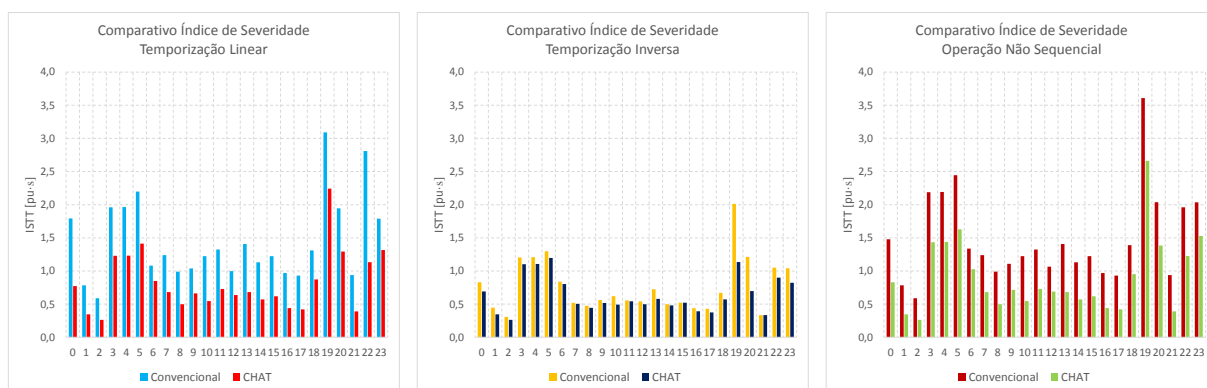


Figura 6.9 – ISTT – Comparativo método convencional e CHAT.

Fonte: Elaborado pelo autor

Com um comportamento semelhante ao ISTT, o tempo de regularização da tensão é menor em todos os modos de operação, sendo reduzido em média 54,29% para a temporização linear, 20,93% em temporização linear e 50,95% com o uso de operações não sequenciais.

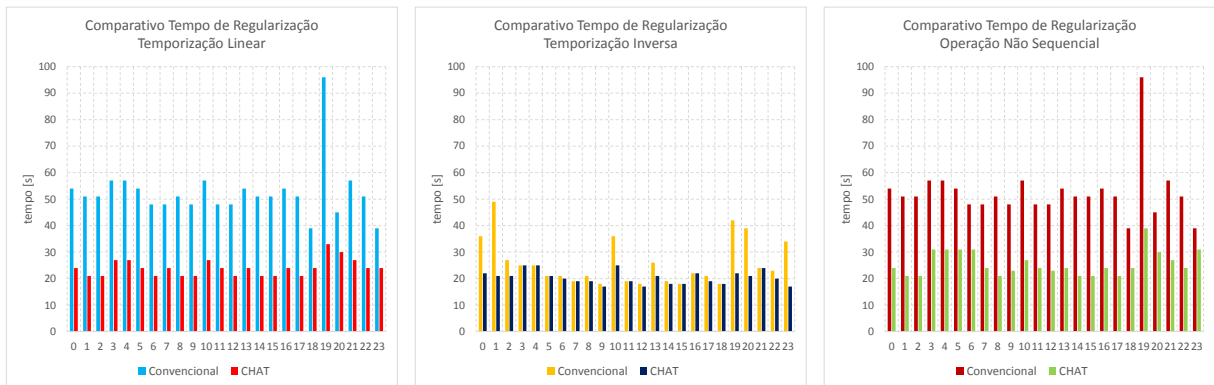


Figura 6.10 – Tempo de Regularização – Comparativo método convencional e CHAT.

Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se um resultado bastante superior com o uso do CHAT frente a operação convencional dos reguladores de tensão. A influência do controle centralizado atuando para antecipar o processo de regularização e da limitação nas posições de TAP traz resultados diretos na melhora da qualidade do fornecimento, minimizando as transgressões de tensão.

Avaliando a operação do CHAT nas condições de manobra e reconfiguração dos alimentadores, percebe-se também resultados positivos quando comparada com a operação convencional. Primeiramente, a atuação do controle individual permite adequar os ajustes para o novo patamar de carga, evitando possíveis sobretensões causadas pelo aumento da corrente de carga percebido pelo LDC. Em segundo lugar, a operação do controle hierárquico que ajusta a coordenação dos equipamentos sem a necessidade de intervenção de equipes de campo ou operadores pois o sistema envia diretamente os novos parâmetros aos reguladores via sistema SCADA. E por fim a atuação do controle centralizado que atua diretamente nos equipamentos acelerando o processo de regularização para as transições mais severas de carga e tensão otimizando a operação dos RTs e reduzindo as transgressões na tensão fornecida. A análise de cada um dos indicadores para a situação de manobra permite visualizar esses benefícios comparando a operação convencional com a aplicação do CHAT, verificando o comportamento nos 24 patamares considerados. Na Figura 6.11, pode-se verificar que o uso do CHAT resultou em uma menor quantidade de comutações em alguns patamares, totalizando uma redução de 9,52%

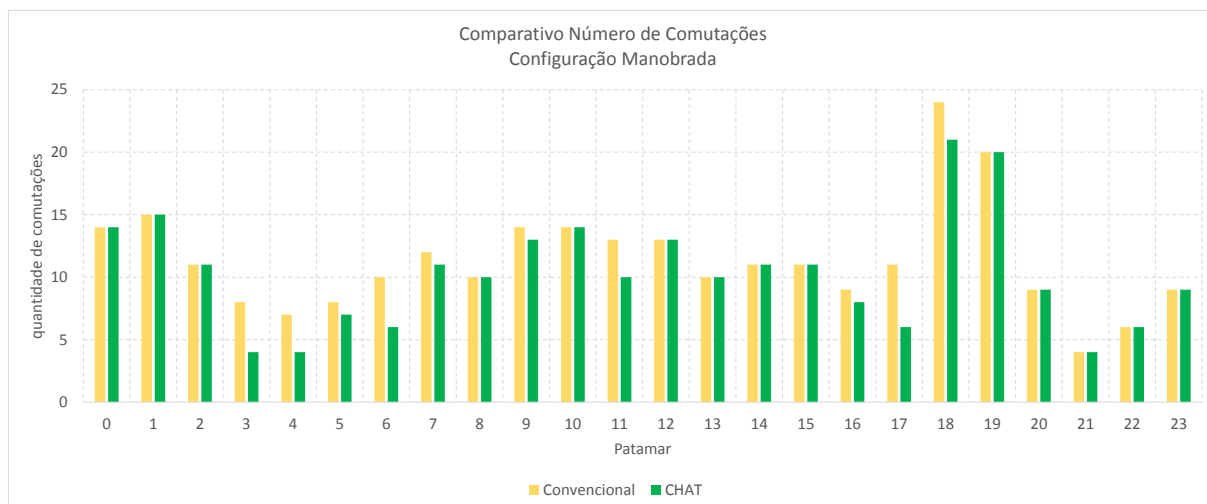


Figura 6.11 – Número de comutações no sistema reconfigurado

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o índice de severidade a manobra trouxe resultados bastante prejudiciais ao sistema no período noturno, em especial nos patamares entre as 19 h e 21 h, dado o perfil de carga utilizado, o que demonstra que neste intervalo essa manobra só seria recomendada em casos de contingência, não sendo uma manobra usual em condições normais de operação. Mesmo com essa restrição, a aplicação do CHAT foi responsável pela redução no ISTT quando comparado com a operação convencional dos reguladores, como pode ser visto na Figura 6.12. A redução nesses horários foi de 1,48% e ao longo das 24 horas chegou a 6,19%.

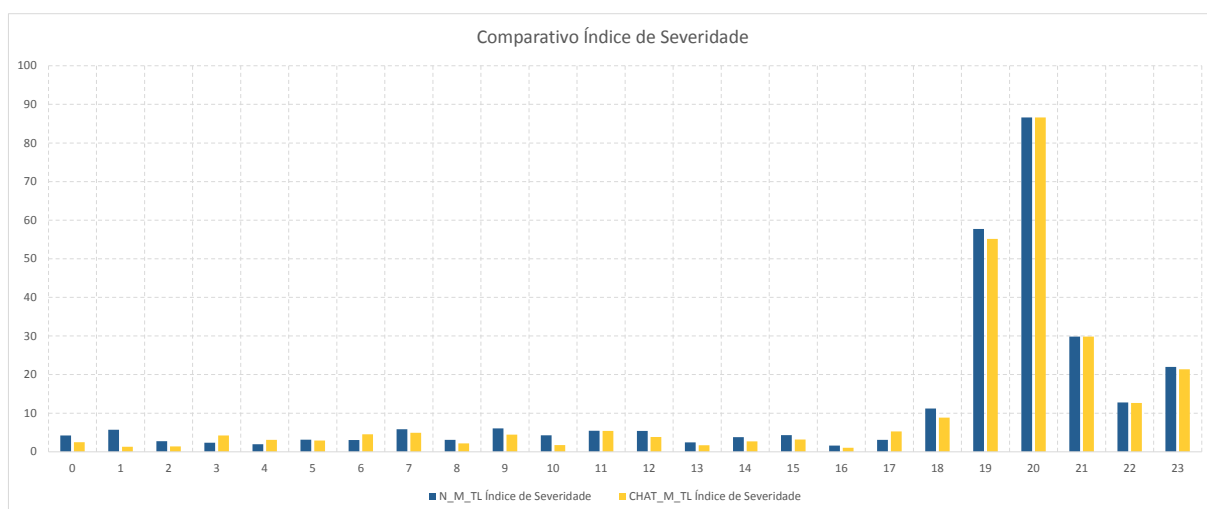


Figura 6.12 – ISTT no sistema reconfigurado

Fonte: Elaborado pelo autor

O tempo de regularização da tensão foi significativamente reduzido, conforme demonstra a Figura 6.13. Nessa condição a aplicação do CHAT reduziu, em média, o tempo de regularização ao longo dos 24 patamares em 50,16%.

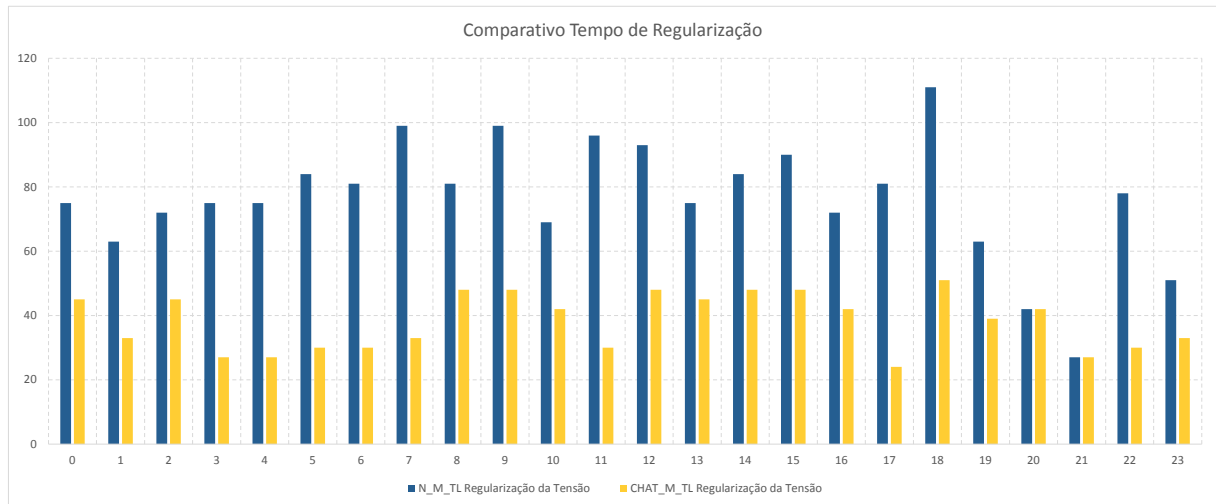


Figura 6.13 – Tempo de Regularização no sistema reconfigurado

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se perceber com esse comparativo a eficácia da aplicação do CHAT na adequação da tensão em condições de reconfiguração do sistema. Mesmo nos cenários onde a reconfiguração não seria normalmente recomendada, existe o benefício de uma resposta mais rápida do sistema diminuindo, na medida do possível, a transgressão dos níveis de tensão. Nos demais patamares, onde os níveis de carregamento permitem ao sistema a transferência de carga entre os alimentadores os benefícios são mais evidentes pois permitem, além de um melhor tempo de resposta e redução das transgressões, uma menor quantidade de comutações dos reguladores.

Em caso de falha de um dos equipamentos, como visto nos cenários 6 e 7, os resultados não são plenamente alcançados pela eliminação de um ponto de ação do controle centralizado, no qual não há possibilidade de limitação de TAP nem antecipação de operações. Ainda assim são obtidos bons resultados pois os demais reguladores operam sob ação do CHAT, considerando os efeitos das comutações adicionais do RT bloqueado e adequando o sistema a essa limitação em um dos equipamentos.

6.1 Considerações finais

No Capítulo 6 foram apresentadas análises dos resultados da aplicação da metodologia em um sistema teste, comparando as condições da aplicação do CHAT frente a operação convencional dos reguladores de tensão. Além disso a avaliação dos cenários de bloqueio do CHAT em um dos reguladores do sistema demonstra que, mesmo com a redução de um equipamento comandado pelo controle centralizado, são obtidas melhorias. No entanto estas melhorias estão diretamente relacionadas com o grau de influência do equipamento sobre os demais. Pode-se, com base nesta análise, verificar que aplicação parcial do CHAT em um alimentador também traz resultados positivos para a rede de distribuição, permitindo adequar mais rapidamente os níveis de tensão. No entanto é recomendada uma avaliação prévia do sistema a fim de identificar quais equipamentos são mais representativos priorizando estes para a aplicação.

7 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi desenvolvida uma metodologia para o controle dos níveis de tensão realizando a alteração dinâmica dos ajustes dos reguladores de tensão, operando na configuração original da rede ou sob condições de manobras, considerando sua aplicação em um ambiente com recursos de automação e em redes elétricas inteligentes. A aplicação do CHAT permite adequar rapidamente a forma de operação dos controladores para diferentes condições operativas. Foi também realizada uma avaliação dos reguladores operando no modo convencional, com diferentes modos de operação e temporização, com destaque para a temporização inversa, permitindo compreender melhor os pontos positivos e negativos desta funcionalidade presente nos equipamentos.

Os esquemas de controle desenvolvidos, consideram a aplicação em um controle centralizado, associado a integração do sistema de controle com o sistema SCADA, além de algoritmos e funções que deverão ser implementadas nos controladores, através de módulos adicionais acoplados aos controladores existentes ou nos próprios reguladores quando do desenvolvimento de novas versões destes equipamentos.

Em um sistema com pequenas condições de manobra ou transferência de cargas, a metodologia CHAT atua basicamente na melhoria dos níveis de tensão de acordo com a sazonalidade da carga e nos diferentes patamares de carga que ocorrem durante o dia. Permite adequar de forma mais rápida e efetiva os níveis de tensão também em casos de perda de blocos de carga, como em casos de contingência. Para sistemas com maior possibilidade de transferência de cargas entre alimentadores, essas alterações na configuração são percebidas pelo sistema SCADA, através do monitoramento das chaves e pela alteração do perfil de carga dos reguladores. Nestes casos os alarmes previamente configurados enviam informações das alterações para o CHAT, no qual são atualizadas as configurações da rede e avaliada a operação dinâmica dos reguladores estabelecendo os tempos de operação e limites de posição de TAP indicados para a transição identificada. A atuação dos controladores com os novos valores estabelecidos traz resultados mais adequados com resposta mais rápida e conseqüentemente com menos transgressões nos níveis de tensão do que na operação convencional.

Neste trabalho não foram avaliados os aspectos relacionados a performance do processamento, tempos de resposta dos módulos de controle e sistema de comunicação, no entanto, quando comparados aos ajustes convencionais de controle de tensão pode-se garantir ganhos relacionados aos tempos de regularização dos níveis de tensão. Além disso a aplicação dos controladores distribuídos reduz a necessidade de processamento do controle centralizado,

possibilitando uma redução da necessidade de processamento das ferramentas relacionadas ao ADMS.

A aplicação da matriz hierárquica, juntamente com a matriz de tensões, possibilita a identificação da sequência de atuação dos reguladores, bem como a influência exercida entre os equipamentos, auxiliando na operação coordenada dos mesmos e quando necessário fazendo-os operar de maneira seletiva. Visto que no cenário das redes inteligentes, constantes chaveamentos e alterações nas topologias podem ser executadas, o desenvolvimento e implementação de funções inteligentes para o controle de tensão tornam mais flexível a execução destas manobras, uma vez que o sistema, constantemente monitorado, terá os equipamentos ajustados na melhor condição.

7.1 Contribuições inovadoras da tese:

Diante da revisão bibliográfica realizada, pode-se destacar como contribuições inovadoras desse trabalho, em relação à reconfiguração de redes de distribuição:

- Desenvolvimento e aperfeiçoamento de modelos de controle para os reguladores de tensão, considerando sua aplicação nas redes inteligentes.
- Avaliação da operação dos reguladores de tensão considerando os efeitos das reconfigurações da rede de distribuição e as transições entre os patamares de carga, em condições de fluxo de potência direto ou inverso.
- Desenvolvimento de funções de auto ajuste dos reguladores de tensão otimizando o controle em nível local.
- Análise dinâmica do comportamento dos reguladores considerando a interação entre os equipamentos, através de um controle hierárquico e centralizado para definição dos diversos parâmetros dos reguladores (tensão de referência, insensibilidade, temporização, tipo de temporização, tempo de comutação, compensação de queda na linha)

7.2 Sugestões de continuidade do trabalho:

Dentre as possibilidades de continuidade do trabalho apresentado nesta tese, sugere-se:

- aperfeiçoamento dos controladores individuais com a aplicação de métodos de previsão de carga e tensão de curtíssimo prazo possibilitando ações preventivas dos controladores;
- avaliação dinâmica da queda de tensão entre os reguladores aprimorando a matriz das tensões;
- uso de outras técnicas e métodos de controle na implementação nos módulos de controle individual e no controle centralizado;
- avaliação do CHAT com estratégias de conservação da energia, avaliando condições de aumento e redução de tensão de acordo com os modelos de carga;
- análise das implicações dos controles em redes com a presença de geração distribuída.

7.3 Publicações de trabalhos relacionados à tese em Congressos:

Pereira, P. R. ; Canha, L. N. ; Abaide, Alzenira R. ; Emmel Jr., R. R. **Aplicação do Potencial das Redes Inteligentes (Smart Grid) no Aumento da Eficiência Operacional de Reguladores de Tensão e Zonas de TAP em Sistemas de Distribuição.** XIX SENDI - SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Rio de Janeiro, 2010.

Pereira, P. R. ; Canha, L. N. ; Milbradt, Rafael Gressler ; Abaide, A. R. ; Schmaedecke, S. ; Arend, Gustavo ; Madruga, E. **Optimization of Voltage Regulators Settings and Transformer Tap Zones in Distribution Systems with Great Load Variation Using Distribution Automation and the Smart Grids Initiatives.** 8th International Conference on the European Energy Market (EEM), Zagreb, 2011.

Pereira, P. R. ; Canha, L. N. ; Milbradt, R. G. ; Abaide, A. R. ; Schmaedecke, S. ; Emmel Jr., R. R. **Optimization of Voltage Regulators Settings and Transformer Tap Zones in Distribution Systems with Great Load Variation Using the Smart Grids Initiatives.** CIRED - 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 2011.

Carneiro, R. V., Canha, L. N., Abaide, A. R., Wenzel, J. A., Pereira, P. R. S., Schmaedecke, S. M., **Aplicação de Lógica Fuzzy para aperfeiçoamento do controle de reguladores de tensão no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.** CLAGTEE - THE

9th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, Mar del Plata, 2011.

Wenzel, J. A., Canha, L. N., Abaide, A. R., Carneiro, R. V., Pereira, P. R. S., Schmaedecke, S. M., **Aplicação de Redes Neurais Artificiais para o Desenvolvimento de Métodos no Controle de Tensão em Sistemas de Distribuição.** CLAGTEE - THE 9th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, Mar del Plata, 2011.

Garcia, E. D. ; Canha, L. N. ; Abaide, A. R. ; Pereira, P. R. S. ; Milbradt, R. G. . **Voltage Forecasting in a Very Short Time Through the Application of Nebulous Systems.** Renewable Energy and Power Quality Journal, v. 10, p. 523, 2012.

Milbradt, Rafael Gressler ; Canha, L. N. ; Pereira, P. R. ; Abaide, A.R. ; Dutra, L. G. ; Schmaedecke, S. **Real-time evaluation of voltage control in distribution systems using remote measurements and smart meters.** 9th International Conference on the European Energy Market (EEM), Florence, 2012.

7.4 Solicitação de Registro de Patente:

Pereira, P. R. S.; Canha, L. N. **Controle Hierárquico e Adaptativo para Aumento do Desempenho Operacional de Reguladores de Tensão em Redes Elétricas Inteligentes.** Protocolado junto ao Núcleo de Inovação e Transferência de Tecnologia da UFSM (NIT/UFSM) sob nº 00188 PI/2014 - Pedido de Patente, Santa Maria, RS, 28 de Fevereiro de 2014.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN, S. U. et al. **Compensação de Potência Reativa por meio de Instalação de Bancos Capacitores Relocáveis em Sistemas de Distribuição**, VII CBQEE, Santos, SP, 2007.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica**. Brasília, 2010a.

_____. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Projeto estratégico: Programa brasileiro de rede elétrica inteligente**. Chamada n° 011/2010. Brasília, 2010b.

ARAÚJO, S. G.; VIEIRA, J. G. **Automação da Distribuição e a Smart Grid**. In: SMART GRID NEWS. São Paulo: 2011. Disponível em: <[http:// smartgridnews.com.br](http://smartgridnews.com.br)>. Acesso em: 28 jan. 2012.

AREDES, M. et al., **Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Taps para a Compensação de Variações de Tensão de Curta Duração**, Belo Horizonte, 2006.

AREDES, M.; ENCARNAÇÃO, L. F.; REIS, M. S.; MOOR, J.; GAVAZZI, M.; SANCHES, C. C.; **Desenvolvimento e Implementação de um Modelo Digital do Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de TAPS Operando num Ramal de Distribuição de Média Tensão**, XVIII SENDI, Recife, PE, Outubro de 2008.

BASTOS, C. A. M. et al; **Proteção e Supervisão de Sistemas Elétricos numa Estratégia Smart Grid com Redes IP de Nova Geração**, Salvador, BA, 2011.

BAUER, P.; HAAN, S. W. H.; **New Concept for Voltage Control**, Netherlands, DF, 1998.

BECKWITH ELECTRIC; **Application Guide: M-6200A – Communications, Hardware Kit and Installation Instructions**, USA, 2007.

_____. **Instruction Book: M-6200a Digital Voltage Regulator Control**, USA, 2007.

BEÊ, R. T. **Alocação de Bancos de Capacitores em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos**, Curitiba, 2007.

BELLMAN, R.; ZADEH, L. A. **Decision making in a fuzzy environment**. *Management Science* 17(4), p.141-164, 1970.

BERNARDON, D. P.; KÖNIG, A. L. Curso de Extensão Unisinos. **Sistemas de Energia – Módulo II: Equipamentos de Sistemas de Distribuição**. São Leopoldo, 2005. Não paginado.

BOROZAN, V.; BARAN, M. E.; NOVOSEL, D. **Integrated Volt/Var Control in Distribution Systems**. 2001.

BREMERMANN, L. E. **Controle Fuzzy Volt/Var em Sistemas de Distribuição**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CANHA, L. N. et al. **Problemas de controle de tensão em redes de distribuição com fontes distribuídas de geração e armazenamento de energia.** In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 5., 2003, Aracaju. **Anais...** Aracaju, 2003. 1 CD-ROM.

CARRARO, E., BENEDIK, C. R., MARQUES, R. F., ALVES, M. E. G.; **Experiência com Relé Regulador de Tensão com Ajustes Múltiplos Programáveis,** XVII SENDI, Belo Horizonte, MG, Outubro de 2006.

COOPER POWER STSTEMS; **S225-10-30 - VR-32 Voltage Regulator with Quik-Drive Tap-Changer Installation, Operation, and Maintenance Instructions,** USA, 2012.

_____. S225-11-1 – Instruções de instalação, operação e manutenção do controle C L-6, USA, 2004.

CORSI, S., POZZI, M., SABELLI, C., SERRANI, A. **The Coordinated Automatic Voltage Control of the Italian Transmission Grid—Part I: Reasons of the Choice and Overview of the Consolidated Hierarchical System.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 4, November 2004.

CORSI, S., POZZI, M., SFORNA, M., DELL'OLIO, G. **The Coordinated Automatic Voltage Control of the Italian Transmission Grid—Part II: Control Apparatuses and Field Performance of the Consolidated Hierarchical System.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 4, November 2004.

CRISPINO, Ferdinando et al. **Automação de Redes de Distribuição de Energia Elétrica.** São Paulo, SP, Brasil, 2000.

FALCÃO, D. M.; **Redes Elétricas Inteligentes: Smart Grid,** Seminário Inserção de Novas Fontes e Redes Inteligentes no Planejamento Energético Nacional, Setembro de 2012.

FEIJÓ, W. L. **Um estudo sobre coordenação e ajuste de transformadores com mudança de tap sob carga e de bancos de capacitores para suporte das ações de controle coordenado de tensão e potência reativa.** 2002. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)—Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

FELBER, L. A. **Regulação de Tensão em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica.** 2010. 137 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica)—Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

FU, L.; PAL, B.; CORY, B. **Voltage regulation for primary level power networks by virtual voltage coordinated control.** 2006. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 20 maio 2012.

GAO, C.; REDFERN, M. A.. **A Review of Voltage Control in Smart Grid and Smart Metering Technologies on Distribution Networks.** In.: IEEE Conference Publications, 2011. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 18 abr. 2012.

GARCIA, E. D. et al. **Voltage Forecasting in a Very Short Time Through the Application on Fuzzy Systems.** In: International CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, Santiago de Compostela, 2012. Anais... Santiago de Compostela, 2012a. 1 PEN-DRIVE.

_____. **Voltage Forecasting in a Very Short Time Through the Application of Nebulous Systems.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4., Goiânia, 2012. Anais... Goiânia, 2012b. 1 PEN-DRIVE.

GUIMARÃES, R. O. **Avaliação dos riscos de violação de conformidade de tensão em sistemas de distribuição, utilizando métodos probabilísticos e conjunto *fuzzy*.** 2008. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Universidade de São Paulo, 2008.

HAFFNER, S. et al. **Alocação de Bancos de Capacitores em Redes de Distribuição de Energia Visando Eliminar Violações de Tensão** Revista Controle & Automação/Vol.20 no.4, 2009.

HIYAMA, T. et al. **On-line Estimation and Control of Voltage Profile along 6.6 kV Feeders.** IEEE Conference Publications, 2005. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 28 abr. 2011.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.C.B.; ROBBA, E.J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2005. 328 p.

HARLOW, J. H. **Electric Power Transformer Engineering.** USA: CRC Press, 2012. 693 p.

ITB. **Regulador de Tensão Monofásico RAV-2 – Manual de Instruções MI-005.** Birigui, 2011. 28 p.

JAUCH, E. T. **Volt/var Management An Essential “SMART” Function.** Power Systems Conference and Exposition, 2009. IEEE/PES.

LEMOS, F. A. B. et al. **Integrated Volt/var Control in Distribution Systems.** 14th PSCC, Sevilha, 2002.

LU, Q. Y. et al. **Integrated Coordinated Optimization Control of Automatic Generation Control and Automatic Voltage Control in Regional Power Grids** Energies 2012, doi:10.3390/en5103817.

MADRUGA, E. P. **Alocação e parametrização integradas de banco de capacitores e reguladores de tensão considerando as redes secundárias em sistemas de distribuição.** 2011. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

MASUDA, M. **Aplicação do Dispositivo FACTS (Flexible AC Transmission Systems) em Sistema de Distribuição – Simulação de Desempenho.** 2006. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MATHWORKS, The. **Fuzzy Logic Toolbox User’s Guide.** 2012. Disponível em: <<http://www.mathworks.com>>. Acesso em: 12 mar. 2012.

_____. **SimPowerSystems Toolbox User’s Guide.** 2012. Disponível em: <<http://www.mathworks.com>>. Acesso em: 10 out. 2012.

MILBRADT, R. G. **Métodos e algoritmos para ajuste dos meios básicos para controle de tensão em sistemas de distribuição.** 2007. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

MIRANDA, Vladimiro. et al. **An Improved Fuzzy Inference System for Voltage/VAR Control**. IEEE Conference Publications, 2007. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 28 abr. 2011.

MONTEIRO, T. C. et al. **Desenvolvimento e Implementação de Soluções FACDS no Sistema da CPFL – FACDS “Flexible Alternating Current Distribution Systems”**. IV CITENEL, 2007.

NAVARRO, L. et al. **The Evolution Towards a Smart Distribution and Impact on Electric Power Systems: Cigre Strategy and Undertaken Actions.**, Seminário Técnico de Geração Dispersa e Distribuída , Belo Horizonte, MG, 2008.

NEUSSER, L. et al. **Very short-term load forecast for demand side management in absence of historical data**. In: International CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, Santiago de Compostela, 2012. **Anais...** Santiago de Compostela, 2012. 1 PEN-DRIVE.

OLIVEIRA, A. et al. **PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM NOVO REGULADOR DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE 13,8 kV**, V SNCA – Seminário Nacional de Controle e Automação, Salvador, BA, Junho de 2007.

PADILHA, L. N. **Análise comparativa de estratégias para regulação de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica na presença de geradores distribuídos**. 2010. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PEREIRA, J. A.N. **Detector de Anormalidade do Controle Automático da Tensão dos Transformadores da Distribuição – CQT**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 19., 2010, São Paulo. **Anais...**, São Paulo, 2010. 1 CD-ROM.

PEREIRA, P. R. S. **Métodos para otimização dos ajustes dos reguladores de tensão zonas de TAP em sistemas de distribuição**. 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

PFITSCHER, Luciano Lopes. **Reconfiguração Automática das Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Monitoramento em Tempo Real**. 2013. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, 2013.

RANAMUKA, D., AGALGAONKAR, A. P., MUTTAQI, K. M. **Online Voltage Control in Distribution Systems With Multiple Voltage Regulating Devices**. IEEE Transactions on Sustainable Energy, accepted for inclusion in s future issue, 2013.

REINHAUSEN. **Comutador de Derivações sob Carga Tipo M: Instruções de Serviço**, Germany, 2000, 44p.

REINHAUSEN. **Voltage Regulator TAPCON 230VC: Operation Instructions BA 251/01**, Germany, 2001, 32p.

SCHUCH, L. et al. **Comutador Eletrônico de TAPs Aplicado a um Transformador de Distribuição Monofásico**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4., Goiânia, 2012. **Anais...** Goiânia, 2012. 1 PEN DRIVE.

SEL. **SEL-2431 – Voltage Regulator Control, Instruction Manual Date Code 20100112**, Pullman, 2010. 20 p.

SIMÕES, M. G; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. São Paulo: Blucher, 2007. 186 p.

SHORT, T. A. **Electric Power Distribution Handbook**, CRC Press, 2004.

SPATTI, D. H. **Intelligent System to Control Voltage Regulator Relays**. 2007. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

TAPELETRO. **RT3-1 – Controle para regulador de tensão trifásico**, Contagem, 2007. 24 p.

_____. **Sincronizador de reguladores de tensão monofásicos SINCMaster SM-1: Manual de Instruções**, Contagem, 2012. 39 p.

TENGGU HASHIM, T. J, MOHAMED A., SHAREEF, H. **A review on voltage control methods for active distribution networks**, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 6/2012.

TOSHIBA. **TB-R1000 – Controle para Regulador de Tensão**, Belo Horizonte, 2006. 63 p.

TOLEDO, Fábio. **Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes: Smart Grid Handbook**. Rio de Janeiro: Brasport, 2012. 336 p.

USIDA, W. F. **Controle Fuzzy para Melhoria do Perfil de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2007. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

YE LI. et al. **Improved coordinated control of on-load TAP changers**. In: **IEEE Conference Publications**, 2010. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 29 mar. 2012.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets. Information and Control**, New York, v.8, n.1, p.338–353, 1965.

ZAVODA, F. **Advanced Distribution Automation (ADA) Applications and Power Quality in Smart Grids**. ICED China International Conference on Electricity Distribution, 2010.

ZHANG, P., LI, F. and BHATT, N. **Next-Generation Monitoring, Analysis, and Control for the Future Smart Control Center**. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Vol. 1, No. 2, September 2010.

ZORRILLA, P. B., CANHA, L. N., MILBRADT R. G., ABAIDE, A. R., PEREIRA, P. R., SCHMAEDECKE, S. M. **Methodologies for the Development of a Central Control System in a Smart Grid Environment based in Free Software**. 2013 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org>>. Acesso em: 29 out. 2013.

APÊNDICE A – Características dos Alimentadores do Sistema Teste

AL 1		AL 2		Condutor	Distância (km)
Barra Inicial	Barra Final	Barra Inicial	Barra Final		
800	802	900	902	3#4/0CA	0,7864
802	806	902	906	3#4/0CA	0,5273
806	808	906	908	3#4/0CA	9,8237
808	810	908	910	3#4CAA	1,7691
808	812	908	912	3#4/0CA	11,4300
812	814	912	914	3#4/0CA	9,0617
814	850	914	950	3#4/0CA	0,0030
816	818	916	918	3#4/0CA	0,5212
816	824	916	924	3#4/0CA	3,1120
818	820	918	920	3#4/0CA	14,6761
820	822	920	922	3#4/0CA	4,1880
824	826	924	926	3#4CAA	0,9235
824	828	924	928	3#4/0CA	0,2560
828	830	928	930	3#4/0CA	6,2301
830	854	930	954	3#4/0CA	0,1585
832	858	932	958	3#4/0CA	1,4935
832	888	932	988	3#1/0CA	0,2000
834	860	934	960	3#1/0CA	0,6157
834	842	934	942	3#1/0CA	0,0853
836	840	936	940	3#1/0CA	0,2621
836	862	936	962	3#1/0CA	0,0853
842	844	942	944	3#1/0CA	0,4115
844	846	944	946	3#1/0CA	1,1095
846	848	946	948	3#1/0CA	0,1615
850	816	950	916	3#4/0CA	0,0945
852	832	952	932	3#4/0CA	0,0030
854	856	954	956	3#4/0CA	7,1110
854	852	954	952	3#4/0CA	11,2258
858	864	958	964	3#4/0CA	0,4938
858	834	958	934	3#4/0CA	1,7770
860	836	920	936	3#1/0CA	0,8169
862	838	962	938	3#1/0CA	1,4813
888	890	988	990	3#1/0CA	0,3000

APÊNDICE B – Cargas Distribuídas dos Alimentadores do Sistema Teste

Alimentador	Barra Inicial	Barra Final	Potência Nominal		
			[kVA]	[kW]	[Kvar]
AL1	802	806	17,9	55	29
AL1	808	810	5,4	16	8
AL1	816	824	38	5	2
AL1	818	820	152,1	34	17
AL1	820	822	44,7	135	70
AL1	824	826	4,5	40	20
AL1	824	828	7,6	4	2
AL1	828	830	16,6	7	3
AL1	832	858	163,2	15	7
AL1	834	860	44,7	146	73
AL1	836	840	10,3	40	20
AL1	842	844	50,5	9	5
AL1	844	846	25,5	45	23
AL1	846	848	4,5	23	11
AL1	854	856	2,2	4	2
AL1	858	864	36,2	2	1
AL1	858	834	92,6	32	17
AL1	860	836	31,3	82	43
AL1	862	838	17,9	28	14
AL2	902	906	17,9	55	29
AL2	908	910	5,4	16	8
AL2	916	924	38	5	2
AL2	918	920	152,1	34	17
AL2	920	922	44,7	135	70
AL2	924	926	4,5	40	20
AL2	924	928	7,6	4	2
AL2	928	930	16,6	7	3
AL2	932	958	163,2	15	7
AL2	934	960	44,7	146	73
AL2	936	940	10,3	40	20
AL2	942	944	50,5	9	5
AL2	944	946	25,5	45	23
AL2	946	948	4,5	23	11
AL2	954	956	2,2	4	2
AL2	958	964	36,2	2	1
AL2	958	934	92,6	32	17
AL2	960	936	31,3	82	43
AL2	962	938	17,9	28	14

APÊNDICE C – Cargas Concentradas dos Alimentadores do Sistema Teste

Alimentador	Barra	Potência Nominal		
		[kVA]	[kW]	[Kvar]
AL1	860	76,8	60	48
AL1	840	34,2	27	21
AL1	844	513,1	405	315
AL1	848	76,8	60	48
AL1	890	503,1	450	225
AL1	830	49,2	45	20
AL2	960	76,8	60	48
AL2	940	34,2	27	21
AL2	944	513,1	405	315
AL2	948	76,8	60	48
AL2	990	503,1	450	225
AL2	930	49,2	45	20

APÊNDICE D – Corrente de Carga dos Reguladores – Cenários 1 a 3, 6 e 7

Patamar	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	I[A]	FP	I[A]	FP	I[A]	FP	I[A]	FP	I[A]	FP	I[A]	FP
10	52,07	0,86	48,29	0,87	40,03	0,88	52,07	0,86	48,29	0,87	40,03	0,88
11	40,38	0,87	37,73	0,88	31,80	0,89	40,38	0,87	37,73	0,88	31,80	0,89
12	34,79	0,87	32,63	0,88	27,71	0,89	34,79	0,87	32,63	0,88	27,71	0,89
13	34,01	0,87	31,91	0,88	27,13	0,89	34,01	0,87	31,91	0,88	27,13	0,89
14	34,12	0,87	32,02	0,88	27,22	0,89	34,12	0,87	32,02	0,88	27,22	0,89
15	38,77	0,87	36,26	0,88	30,63	0,89	38,77	0,87	36,26	0,88	30,63	0,89
16	40,30	0,87	37,66	0,88	31,74	0,89	40,30	0,87	37,66	0,88	31,74	0,89
17	46,87	0,86	43,62	0,88	36,42	0,89	46,87	0,86	43,62	0,88	36,42	0,89
18	45,55	0,86	42,42	0,88	35,48	0,89	45,55	0,86	42,42	0,88	35,48	0,89
19	51,09	0,86	47,41	0,87	39,35	0,89	51,09	0,86	47,41	0,87	39,35	0,89
210	42,33	0,86	39,51	0,88	33,20	0,89	42,33	0,86	39,51	0,88	33,20	0,89
111	48,05	0,86	44,68	0,87	37,24	0,89	48,05	0,86	44,68	0,87	37,24	0,89
212	50,58	0,86	46,96	0,87	39,00	0,88	50,58	0,86	46,96	0,87	39,00	0,88
213	46,95	0,86	43,69	0,88	36,47	0,89	46,95	0,86	43,69	0,88	36,47	0,89
114	47,63	0,86	44,30	0,87	36,95	0,89	47,63	0,86	44,30	0,87	36,95	0,89
115	48,97	0,86	45,51	0,87	37,88	0,89	48,97	0,86	45,51	0,87	37,88	0,89
116	43,77	0,86	40,81	0,88	34,22	0,89	43,77	0,86	40,81	0,88	34,22	0,89
117	43,15	0,86	40,25	0,88	33,78	0,89	43,15	0,86	40,25	0,88	33,78	0,89
118	55,52	0,86	51,38	0,87	42,38	0,88	55,52	0,86	51,38	0,87	42,38	0,88
119	84,28	0,84	76,47	0,86	60,58	0,88	84,28	0,84	76,47	0,86	60,58	0,88
220	92,14	0,83	83,17	0,86	65,18	0,88	92,14	0,83	83,17	0,86	65,18	0,88
121	69,01	0,85	63,34	0,87	51,25	0,88	69,01	0,85	63,34	0,87	51,25	0,88
222	61,16	0,85	56,40	0,87	46,15	0,88	61,16	0,85	56,40	0,87	46,15	0,88
223	68,27	0,85	62,69	0,87	50,78	0,88	68,27	0,85	62,69	0,87	50,78	0,88

APÊNDICE E – Corrente de Carga dos Reguladores – Cenários 4 e 5

Patamar	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	I[A]	FP	I[A]	FP	I[A]	FP	I[A]	FP	I[A]	FP	I[A]	FP
0	110,37	0,82	98,69	0,85	82,62	0,87	7,66	0,89	5,75	0,89	36,76	0,89
1	87,97	0,83	78,65	0,86	66,11	0,88	6,09	0,89	4,58	0,89	31,55	0,89
2	76,97	0,84	68,81	0,86	57,93	0,88	5,31	0,89	4,00	0,89	28,50	0,89
3	75,40	0,84	67,41	0,86	56,77	0,88	5,2	0,89	3,92	0,89	28,04	0,89
4	75,64	0,84	67,62	0,86	56,94	0,88	5,22	0,89	3,93	0,89	28,10	0,89
5	84,83	0,84	75,83	0,86	63,77	0,88	5,87	0,89	4,42	0,89	30,70	0,89
6	87,82	0,83	78,51	0,86	65,99	0,88	6,08	0,89	4,58	0,89	31,50	0,89
7	100,46	0,82	89,81	0,85	75,36	0,87	6,97	0,89	5,24	0,89	34,65	0,89
8	97,92	0,83	87,54	0,85	73,48	0,87	6,79	0,89	5,11	0,89	34,05	0,89
9	108,52	0,82	97,03	0,85	81,26	0,87	7,53	0,89	5,66	0,89	36,37	0,89
10	91,76	0,83	82,03	0,86	68,91	0,88	6,36	0,89	4,78	0,89	32,52	0,89
11	102,76	0,82	91,87	0,85	77,00	0,87	7,13	0,89	5,36	0,89	35,11	0,89
12	107,56	0,82	96,17	0,85	80,55	0,87	7,46	0,89	5,61	0,89	36,16	0,89
13	100,62	0,82	89,95	0,85	75,48	0,87	6,98	0,89	5,25	0,89	34,69	0,89
14	101,89	0,82	91,09	0,85	76,42	0,87	7,07	0,89	5,32	0,89	34,98	0,89
15	104,51	0,82	93,44	0,85	78,30	0,87	7,25	0,89	5,45	0,89	35,51	0,89
16	94,52	0,83	84,50	0,85	70,96	0,87	6,55	0,89	4,93	0,89	33,22	0,89
17	93,33	0,83	83,44	0,85	70,08	0,87	6,47	0,89	4,87	0,89	32,92	0,89
18	116,85	0,81	104,50	0,84	87,40	0,87	8,1	0,89	6,09	0,89	38,04	0,89
19	171,44	0,77	153,25	0,81	127,11	0,86	11,56	0,89	8,66	0,89	43,90	0,88
20	188,30	0,76	168,64	0,80	139,44	0,85	12,44	0,89	9,30	0,89	43,85	0,88
21	142,19	0,79	127,13	0,83	105,85	0,86	9,79	0,89	7,34	0,89	41,80	0,88
22	127,44	0,80	113,92	0,84	95,08	0,87	8,82	0,89	6,62	0,89	39,80	0,88
23	140,79	0,79	125,88	0,83	104,83	0,86	9,7	0,89	7,28	0,89	41,65	0,88