Michele Akemi Haro

Desenvolvimento de Abordagem Inteligente Para Controle de Tensão na Rede de Baixa Tensão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, sendo parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas Dinâmicos.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino

São Carlos

2015

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

H292d Haro, Michele Akemi
Desenvolvimento de Abordagem Inteligente Para
Controle de Tensão na Rede de Baixa Tensão de Sistemas
de Distribuição de Energia Elétrica / Michele Akemi
Haro; orientador Rogério Andrade Flauzino. São Carlos,
2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Sistemas Dinâmicos -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Controle de tensão. 2. Sistema de distribuição.
3. Baixa tensão. 4. Rede secundária. 5. Sistemas
inteligentes.. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **MICHELE AKEMI HARO.**

Título da dissertação: "Desenvolvimento de abordagem inteligente para controle de tensão na rede de baixa tensão de sistemas de distribuição de energia elétrica".

Data da defesa: 19/11/2015

Comissão Julgadora:

Prof. Associado **Rogério Andrade Flauzino**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **José Roberto Sanches Mantovani**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Ilha Solteira)

Prof. Dr. **Claudionor Francisco do Nascimento**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Resultado:

Aprovada

Aprovada

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Página intencionalmente deixada em branco

“Dizem que a vida é para quem sabe viver, mas ninguém nasce pronto. A vida é para quem é corajoso o suficiente para se arriscar e humilde o bastante para aprender.”

Clarice Lispector

Agradecimentos

Acima de tudo, a Deus que me permitiu mais essa conquista.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino, pelo apoio, paciência, dedicação e confiança creditados em mim durante a execução deste trabalho.

Aos meus pais e irmãos, por não medirem esforços para que eu pudesse dedicar aos meus estudos e alcançar os meus objetivos.

Ao meu amado noivo Jáder Carneiro, pelo incentivo, confiança e companheirismo que me inspiraram e não me deixaram desistir desse sonho.

Ao meu amigo Ernesto Mertens Jr por me incentivar, ensinar e contribuir com a realização desse trabalho. E ao José Francisco Rezende, pela oportunidade e incentivo.

Aos professores da pós-graduação da USP São Carlos, pelos ensinamentos nessa nova etapa e pelo total apoio, em especial aos Professores Ivan Nunes da Silva e Danilo Spatti.

Aos meus colegas de trabalho, por me incentivarem e não me deixarem desistir desse objetivo.

À ELEKTRO, pela oportunidade e confiança e por acreditar em mim e me permitir dedicar a essa conquista pessoal.

Resumo

HARO, M. A. (2015). *Desenvolvimento de Abordagem Inteligente Para Controle de Tensão na Rede de Baixa Tensão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.

Os métodos convencionais para o controle de tensão concentram-se na média tensão. Em alguns casos não são suficientes para a correção da tensão na rede secundária. Este trabalho apresenta os problemas relacionados à regulação de tensão na baixa tensão, os métodos convencionais para correção da tensão e uma estratégia para o controle de tensão na rede secundária de sistema de distribuição de energia elétrica. A solução final proposta é um conjunto de transformador com taps no lado de baixa tensão, hardware e software que promovem a comutação das derivações do transformador de forma automática. Para o desenvolvimento dessa estratégia será abordada a aplicação de sistemas inteligentes, o sistema fuzzy, e a estimação de modelos elétricos dos transformadores de distribuição. O objetivo desse produto é ser uma solução prática, viável técnica e economicamente para a regulação da tensão em cenários onde os métodos convencionais não o são. Os protótipos dessa solução foram montados e testados em laboratório e em campo e os resultados atenderam ao objetivo proposto.

Palavras chave: controle de tensão, sistema de distribuição, baixa tensão, rede secundária, sistemas inteligentes.

Abstract

HARO, M. A. (2015). *Development of Intelligent Approach to Control Voltage in Low Voltage Distribution Systems* (Master's Degree) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.

The conventional methods for voltage control concentrated in medium voltage. In some case, they are not enough to correct the voltage on secondary grid of distribution. This paper presents a strategy to control the voltage on the low voltage of the distribution grid. As proposed for dealing of this problem is made the presentation of an architecture for the intelligent automatic control, that is composed of distribution transformer with tap on the low side, hardware and software. For the development of this strategy will be approached the application the intelligent systems, Fuzzy Systems, and the estimation of electrical model of distribution transformers. The goal with this design is to provide grants to set up a system for regulating the voltage on the low side which is technically and economically feasible to be deployed where conventional solutions, with the inclusion of line regulators, are not.

Keywords: voltage control, distribution system, low voltage, secondary distribution grid, intelligent systems.

Lista de Siglas e Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVR	Relé Regulador Automático de Tensão
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão.
DICRI	Duração da Interrupção Individual Ocorrida em Dia Crítico por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão
DRC	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica
DRCM	Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Crítica
DRP	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária
DRPM	Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Precária
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão
LTC	<i>“Load Tap Changer”</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SEP	Sistema Elétrico de Potência

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Comparação dos limites de tensão para a faixa de tensão 220/127	14
Figura 2.2 - Circuito de compensação de queda de linha.	22
Figura 2.3 – Perfis de tensão com e sem atuação do LDC.	24
Figura 2.4 – Centro de carga para uma condição de carga pesada.....	27
Figura 2.5 – Centro de carga para uma condição de carga leve.....	27
Figura 2.6 – Capacitores instalados ao longo do alimentador e no barramento 13,8kV da subestação.	30
Figura 2.7 – Reguladores de tensão instalados ao longo do alimentador.....	31
Figura 2.8 – Alimentador de distribuição com e sem regulador de tensão.....	32
Figura 2.9 – Regulador monofásico ANSI tipo A.	33
Figura 2.10 – Conexões trifásicas para o autotransformador.....	34
Figura 2.11 – Esquema do relé regulador automático de tensão.....	36
Figura 2.12 – Esquema do relé regulador de tensão com LDC.....	37
Figura 2.13 – Controles do relé regulador de tensão.	38
Figura 2.14 – Diagrama esquemático do sistema estudado.	43
Figura 2.15 – Sistema de distribuição 69 /11,4 kV – Taiwan Power Company.	45
Figura 2.16 – Diagrama de execução do método proposto.....	47
Figura 2.17 – Sistema simplificado para estudo do método.....	50
Figura 3.1 – Funções de pertinência.	58
Figura 3.2 – Representação da variável linguística temperatura.....	61
Figura 3.3 – Mecanismo de inferência <i>fuzzy</i>	63
Figura 3.4 – Diagrama típico de um modelo de Sistemas <i>Fuzzy</i>	64
Figura 4.1 – Diagrama esquemático preliminar da solução proposta.....	69
Figura 4.2 – Diagrama esquemático representado a origem das medições	70
Figura 4.3 - Função densidade de probabilidade acumulada.....	71
Figura 4.4 – Avaliação do resumo das campanhas de medição.	72
Figura 4.5 – Tensão no PAC em função da tensão secundária	73

Figura 4.6 – Comutador do lado de alta.....	75
Figura 4.7 – Transformador de 45 kVA.....	76
Figura 4.8 – Transformador de 75 kVA.....	79
Figura 4.9 – Transformador de 75 kVA com núcleo amorfo.	82
Figura 4.10 – Representação da comutação sob carga eletrônica com tiristores.....	86
Figura 4.11 – Módulo completo da eletrônica de potência.....	86
Figura 4.12 – Módulos de eletrônica de potência acomodados em painel.	87
Figura 4.13 – Controlador inteligente sendo calibrado com sinais vindos da caixa de corrente.....	88
Figura 4.14 - Detalhe do processo de conversão de sinal para valores de engenharia	89
Figura 4.15 – Ferramenta de aquisição de dados RTBT.	90
Figura 4.16 – Ferramenta de monitoramento do acionamento dos taps de eletrônica de potência.	91
Figura 4.17 – Modelo equivalente do transformador	92
Figura 4.18 – Sequência de operação do sistema tomada de decisão	94
Figura 4.19 – Acompanhamento das comutações de tap produzidas pelo sistema inteligente.	95
Figura 4.20 – Chaveamento da eletrônica de potência.	96
Figura 4.21 – Pré-teste realizado no controle de tensão.	97
Figura 4.22 – Detalhe para o gerador de sinais utilizado para calibração.	97
Figura 4.23 – Disposição final do módulo de controle.	98
Figura 4.24 – Estrutura de acompanhamento de ensaios.	99
Figura 4.25 - Instrumentos para acompanhamento dos ensaios.	99
Figura 4.26 – Módulos de carga para ensaios de eletrônica de potência.....	100
Figura 4.27 – Visualização da eletrônica de potência pronta para ser instalada em campo.....	101
Figura 4.28 – Transformador piloto já instalado.....	101
Figura 4.29 - Resultado do monitoramento da tensão	102

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Pontos de entrega ou conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.	13
Tabela 2.2 – Limites para pontos de entrega em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV.	13
Tabela 2.3 – Principais metodologias de modelagem por fluxo de carga.	21
Tabela 4.1 - Características das derivações dos transformadores.....	74
Tabela 4.2 – Correntes características do transformador de 45 kVA.	76
Tabela 4.3 – Ensaio de resistência ôhmica dos enrolamentos para o transformador de 45 kVA.....	77
Tabela 4.4 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 45 kVA (Taps A e B).	77
Tabela 4.5 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 45 kVA (Taps C e D).....	77
Tabela 4.6 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 45 kVA (Tap E).	78
Tabela 4.7 – Ensaio a vazio para o transformador de 45 kVA.	78
Tabela 4.8 – Ensaio de curto circuito para o transformador de 45 kVA.	78
Tabela 4.9 – Correntes características do transformador de 75 kVA (núcleo de aço silício).	79
Tabela 4.10 – Ensaio de resistência ôhmica dos enrolamentos para o transformador de 75 kVA (com núcleo de aço silício).	80
Tabela 4.11 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 75 kVA - núcleo de aço silício (Taps A e B).....	80
Tabela 4.12 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 75 kVA - núcleo de aço silício (Taps C e D).....	80
Tabela 4.13 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 75 kVA - núcleo de aço silício (Tap E).	81
Tabela 4.14 – Ensaio a vazio para o transformador de 75 kVA (núcleo de aço silício).	81
Tabela 4.15 – Ensaio de curto circuito para o transformador de 75 kVA (núcleo de aço silício).	81
Tabela 4.16 – Ensaio de resistência ôhmica dos enrolamentos para o transformador de 75 kVA (com núcleo amorfo).	83

Tabela 4.17 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 75 kVA - núcleo amorfo (Taps A e B).....	83
Tabela 4.18 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 75 kVA - núcleo amorfo (Taps C e D).....	83
Tabela 4.19 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 75 kVA - núcleo amorfo (Tap E).	84
Tabela 4.20 – Ensaio a vazio para o transformador de 75 kVA (núcleo amorfo).....	84
Tabela 4.21 – Ensaio de curto circuito para o transformador de 75 kVA (núcleo amorfo).	84
Tabela 4.22 – Parâmetros do modelo elétrico equivalente	93
Tabela 4.23 – Resultados dos ensaios a vazio e em curto circuito	93

SUMÁRIO

1	Introdução à dissertação de mestrado.....	1
1.1	Introdução	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Contribuições originais da dissertação.....	4
1.4	Realizações acadêmicas.....	5
1.5	Organização da dissertação.....	5
2	Aspectos relacionados à regulação de tensão em sistemas de distribuição	7
2.1	Aspectos relacionados à qualidade da energia elétrica	7
2.2	Requisitos normativos referentes ao controle de tensão em sistemas de distribuição	11
2.3	Queda de tensão.....	17
2.4	Abordagens convencionais para a regulação de tensão.....	18
2.4.1	<i>Modelagem por fluxo de carga</i>	<i>19</i>
2.4.2	<i>Compensação por queda de tensão na linha</i>	<i>21</i>
2.4.3	<i>Dispositivos de controle de tensão</i>	<i>28</i>
2.5	Abordagens inteligentes para o controle de tensão	39
2.5.1	<i>Introdução.....</i>	<i>39</i>
2.5.2	<i>Controle ótimo de volt/var em sistemas de distribuição utilizando programação dinâmica e sistemas fuzzy</i>	<i>42</i>
2.5.3	<i>Sistema híbrido para controle de tensão e potência reativa em sistemas de distribuição</i>	<i>44</i>
2.5.4	<i>Controlador Fuzzy e Annealing simulado para controle de volt/var em sistemas de distribuição</i>	<i>49</i>
2.6	Considerações parciais	53
3	Introdução aos sistemas de inferência fuzzy	55
3.1	Introdução	55
3.2	Conjuntos fuzzy.....	57
3.3	Operadores fuzzy	59
3.4	Regras fuzzy	60
3.5	Sistemas de inferência fuzzy.....	62
3.6	Considerações parciais	65

4	Proposta baseada em comutação no lado de baixa tensão de transformadores de distribuição para regulação de tensão	67
4.1	Introdução.....	67
4.2	Transformador de distribuição com derivações no lado secundário	69
	4.2.1 <i>Análise estatística para a determinação dos requisitos de regulação de tensão.....</i>	70
	4.2.2 <i>Constituição e características de transformadores com derivações no enrolamento de baixa tensão.....</i>	74
4.3	Aspectos referentes à eletrônica de potência dedicada à comutação em transformadores de distribuição.....	85
4.4	Aspectos referentes ao controle inteligente de tensão	87
	4.4.1 <i>Condicionamento de sinais de tensão e corrente</i>	88
	4.4.2 <i>Controle inteligente de tensão - desenvolvimento do sistema de controle fuzzy para regulação de tensão</i>	92
	4.4.3 <i>Acionamento da eletrônica de potência</i>	95
4.5	Resultados experimentais da solução desenvolvida	96
4.6	Considerações parciais	104
5	Conclusões e trabalhos futuros	107
	Referências bibliográficas	111

1 Introdução à dissertação de mestrado

1.1 Introdução

As concessionárias de energia elétrica são continuamente incentivadas a aprimorar a qualidade do fornecimento do produto energia elétrica e do serviço prestado. Esses incentivos são apresentados tanto por parte dos consumidores, cada vez mais exigentes, quanto pela agência reguladora, a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, através das regulamentações e fiscalizações.

A tensão de fornecimento, de regime permanente, é considerada como um dos principais requisitos quando se trata da qualidade do produto da energia elétrica. Essa importância é constatada pela legislação vigente, definida pela ANEEL através do Módulo 8 do PRODIST – Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST, 2014). Esse módulo, intitulado de Qualidade da Energia Elétrica, estabelece os procedimentos de qualidade da energia elétrica, no quesito produto e serviço e define os parâmetros e valores de referência relativos à conformidade da tensão em regime permanente e as penalidades referentes à violação desses valores de referência.

O controle de tensão é importante para garantir a estabilidade do sistema elétrico de potência e o bom desempenho dos equipamentos instalados na rede de distribuição e dos clientes conectados nela, além de atender a legislação vigente e evitar penalidades. A operação dos equipamentos por muito tempo fora dos limites de tensão pode prejudicar o bom funcionamento e diminuir a vida útil deles. Além

disso, para o sistema de distribuição, os problemas de regulação da tensão podem resultar em um comportamento errático de esquema de compensação de reativos, em níveis de perdas acima do aceitável, em redução da vida útil de ativos e de acessórios do sistema de distribuição (O'GORMAN; REDFERN; AL-NASSERI, 2005).

Define-se média tensão de distribuição como tensão entre fases cujo valor eficaz varia entre 1 kV a 69 kV e baixa tensão como a tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou inferior a 1 kV, conforme Módulo 1 (PRODIST, 2012).

Convencionalmente, no âmbito da distribuição de energia elétrica, o controle da tensão é realizado na média tensão, atuando nos taps dos transformadores da subestação, nos reguladores de tensão e nos bancos de capacitores instalados ao longo da rede de distribuição. Porém, essas medidas não garantem que todos os clientes instalados na baixa tensão estarão sendo atendidos dentro dos limites estabelecidos, uma vez que não é monitorada a baixa tensão de fornecimento (BERGER; HENNING; KORNER, 2013, CORSI; DE VILLIERS; VAJETH, 2010). Com isso, quando é constatada a transgressão dos limites da tensão de fornecimento, medidas corretivas devem ser tomadas e ainda, compensações financeiras deverão ser pagas pela concessionária, conforme a revisão do Módulo 8, vigente a partir de janeiro de 2015 (PRODIST, 2014). Na revisão anterior, a legislação determinava um prazo para correção do problema de tensão e só depois desse período, as compensações financeiras seriam calculadas.

Como as alternativas convencionais para a regulação da tensão apontam apenas na média tensão, o controle de tensão da baixa tensão não é realizado adequadamente, exigindo novas alternativas para preencher essa lacuna técnica.

A regulação de tensão na baixa tensão, ou seja, mais próxima aos clientes é importante para garantir que a tensão de fornecimento aos clientes ligados na baixa tensão esteja dentro dos limites, garantindo a satisfação do consumidor e também, evitando as compensações financeiras para a concessionária.

1.2 Objetivos

As alternativas convencionais para a regulação da tensão apontam apenas na média tensão, deixando uma possibilidade de transgressão da tensão de fornecimento na baixa tensão.

Diante dessa lacuna técnica e da importância desse tema, esse trabalho tem o objetivo de propor uma alternativa para a regulação de tensão no lado de baixa tensão e com isso, melhorar o perfil de tensão ao longo da rede secundária, mantendo-a em conformidade com os critérios definidos pela ANEEL.

Os transformadores de distribuição são um dos principais ativos da concessionária de energia elétrica. Uma alternativa viável, proposta deste trabalho, é a regulação de tensão na baixa tensão desses equipamentos, por meio de derivações comutadas automaticamente, controlando a tensão mais próxima ao ponto de conexão dos clientes.

O objetivo desse trabalho consiste na concepção, implementação e integração de ferramentas computacionais inteligentes, juntamente com o desenvolvimento de um sistema eletrônico para o controle de tensão na baixa tensão dos transformadores de distribuição. Para também foi realizada uma especificação técnica para os transformadores de distribuição com derivações que serão acionadas automaticamente por esse controle inteligente.

Assim, esse produto tem o objetivo de atender os seguintes requisitos:

- Manter a tensão dentro do nível considerado adequado e atuar mais próximo ao cliente;
- Ser tecnicamente viável;
- Não degradar os índices de qualidade do fornecimento de energia elétrica no sistema de distribuição em que se insere.

1.3 Contribuições originais da dissertação

As principais contribuições da dissertação podem ser pontuadas como se segue:

- Especificação do transformador de distribuição com possibilidade de regulação no lado de baixa tensão no desenvolvimento do sistema de controle de tensão, ambos permitiram o depósito de patente de invenção.
- Originalidade do produto: a partir das especificações, foi possível desenvolver protótipos funcionais de transformadores com comutação de derivações no lado de baixa tensão para promover a regulação de tensão, de sistema de comutação empregando eletrônica de potência, e de sistema para aquisição de dados, processamento e tomada de decisão e acionamento do sistema de comutação. Resumindo, esse protótipo poderá substituir o transformador de distribuição onde a regulação de tensão na média tensão não é suficiente para garantir os níveis adequados de tensão no lado de baixa tensão.

1.4 Realizações acadêmicas

As principais realizações acadêmicas foram:

1. Michele A. Haro, R. A. Flauzino, E. Mertens Jr, R. Portal, D. Spatti, I. Silva. “Controle Inteligente de Tensão em Rede Secundária Utilizando Estimação Elétrica do Modelo do Transformador de Distribuição.” XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI 2015.
2. E. A. Mertens Jr., R. A. Flauzino, Member, IEEE, M. A. Haro, R. T. M. Portal, I. N. da Silva, Member, IEEE, J. F. R. da Silva “*A intelligent voltage control based on estimation of electrical equivalent model of the distribution transformer*”. *The 10th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE* 2013.

1.5 Organização da dissertação

Uma breve introdução sobre a qualidade da energia elétrica e as exigências do setor elétrico, tanto no quesito regulatório, quanto sob o ponto de vista do consumidor é apresentado nesse capítulo. No Capítulo1, ainda são abordados o objetivo desse trabalho e as realizações acadêmicas.

No Capítulo 2 serão abordados os aspectos regulatórios da qualidade da energia elétrica, elencando os requisitos normativos para a tensão de regime permanente. Também serão discutidos os aspectos relacionados à regulação de

tensão de regime permanente, os dispositivos e os principais métodos convencionais para o controle de tensão na rede de distribuição e alguns métodos inteligentes que foram estudados.

No Capítulo 3 se encontram as principais características do Sistema Inteligente proposto neste trabalho, o Sistema Fuzzy. Serão apresentados os fundamentos teóricos, as variáveis de entrada e saída e o relacionamento para o controle de tensão.

No Capítulo 4, será abordada a proposta para a regulação da tensão na baixa tensão e todos os fundamentos teóricos e estatísticos para a especificação desse trabalho. Também, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados em laboratório.

No Capítulo 5, serão realizadas as considerações finais a respeito deste trabalho, a aplicabilidade e os ganhos desta pesquisa para a regulação de tensão na rede secundária.

2 Aspectos relacionados à regulação de tensão em sistemas de distribuição

Uma das principais responsabilidades das concessionárias é distribuir energia elétrica com qualidade, seja no seu fornecimento ou no produto. Em se tratando de qualidade do produto, a distribuidora deve fornecer aos consumidores uma tensão em regime permanente dentro dos níveis adequados, conforme estabelecido pelos órgãos reguladores. Os textos desse capítulo contemplam os principais aspectos relacionados ao controle de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica, abordando os aspectos convencionais e inteligentes para a regulação da tensão e os aspectos regulatórios. O melhoramento do perfil de tensão está relacionado ao adequado e eficiente controle de tensão nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP).

2.1 Aspectos relacionados à qualidade da energia elétrica

As distribuidoras de energia elétrica são cobradas para se adequarem as exigências estabelecidas do mercado, ou seja, devem estar em conformidade com as normas e recomendações exigidas pela agência reguladora e atender a expectativa dos consumidores que quer ser atendido com qualidade e por um preço justo. Por isso, essas empresas precisam se concentrar na eficiência e em uma boa relação preço x qualidade da energia fornecida.

A ANEEL, através do procedimento de distribuição, Módulo 8 (PRODIST, 2014), estabelece os procedimentos referentes à qualidade de energia elétrica no quesito qualidade de serviço e qualidade do produto.

Segundo o Módulo 8, a qualidade dos serviços prestados está relacionada com a avaliação das interrupções do fornecimento de energia elétrica, por meio de indicadores de continuidade coletivos, DEC, FEC e dos indicadores individuais, DIC, FIC, DMIC.

Já a qualidade do produto avalia a conformidade da tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão.

Os aspectos considerados da qualidade do produto em regime permanente ou transitório são:

- a) tensão em regime permanente;
- b) fator de potência;
- c) harmônicos;
- d) desequilíbrio de tensão;
- e) flutuação de tensão;
- f) variações de tensão de curta duração;
- g) variação de frequência.

O controle de tensão de regime permanente, foco desse trabalho, tem sido identificado como uma operação essencial para a qualidade do produto da energia elétrica. Dois pontos mostram a importância disso:

- Tanto os equipamentos da concessionária como os pertencentes aos consumidores são projetados para operar em determinado nível de tensão. A operação prolongada desses equipamentos em uma tensão

fora de limites aceitáveis pode afetar o desempenho, além de causar interrupções não programadas. Por isso, a tensão deve ser mantida dentro de limites aceitáveis.

- Outro ponto importante é quanto à estabilidade dos SEP. O controle de tensão tem um impacto significativo sobre a estabilidade do sistema.

Os problemas relativos ao perfil de tensão nas redes elétricas são um dos mais severos problemas relacionados à qualidade da energia elétrica (QEE).

Os principais problemas relatados pelos consumidores são tensões abaixo do valor nominal, comprometendo a qualidade no fornecimento de energia elétrica. Cabe a ANEEL, por meio de suas normas e procedimentos, regular o setor, buscando atender aos anseios dos consumidores e também uma operação economicamente viável para as companhias.

Quando é relatado um decréscimo de tensão, de qualquer valor, mas com curta duração, este fenômeno recebe o nome de Afundamento de Tensão ou *Voltage Sag*. Um afundamento é um distúrbio de curta duração, inferior a 3 minutos e pode ser ocasionados pela entrada ou saída de grandes cargas do sistema, curto-circuito e falhas de equipamentos no sistema de distribuição. A amplitude típica da tensão nessa situação encontra-se entre 0,1 p.u. e 0,9 p.u (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009, PRODIST, 2014).

Já uma Subtensão ou *Drop* é um fenômeno de longa duração, apresentando queda no valor eficaz da tensão com tempo maior do que 1 minuto ou até 90% do tempo de fornecimento de energia. É ocasionado devido à perda de alimentadores ou transformadores, sobrecarga nos equipamentos, carregamento excessivo nos circuitos dos alimentadores, flutuação de grandes cargas, taps dos transformadores

incorretamente ajustados, desligamento de banco de capacitores e consequentemente excesso de reativos transportado pelos circuitos de distribuição, o que limita a capacidade do sistema no fornecimento de potência ativa e, ao mesmo tempo, eleva a queda de tensão. A amplitude típica encontra-se entre 0,8 p.u. e 0,9 p.u (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009).

Para se solucionar problemas de queda de tensão nos consumidores, inicialmente se faz uma checagem no secundário do sistema de distribuição. Depois se deve certificar que os consumidores não estão isolados no secundário, verificando-se o primário. Se uma queda de tensão está realmente ocorrendo no secundário, deve-se então verificar o carregamento para se ter certeza de que o transformador não está sobrecarregado e também verificar a ligação do neutro do secundário.

Se constatado que o problema está localizado no primário, devem-se balancear as fases, ou seja, redistribuir as cargas entre as fases, com o objetivo de equilibrarem-se as correntes para diminuir a queda de tensão. O regulador de tensão também deve ser verificado, se o equipamento está operando corretamente e se seu ajuste está parametrizado da melhor forma para se melhorar o perfil de tensão, aumentando-se a tensão ou a compensação por queda de linha ou uma largura de banda mais estreita.

Os bancos de capacitores instalados na rede de distribuição também devem ser inspecionados, checando se os fusíveis não estão comprometidos, se o ajuste de tempo não está descalibrado ou o chaveamento está com mau funcionamento.

2.2 Requisitos normativos referentes ao controle de tensão em sistemas de distribuição

Dentro do cenário mundial, a Europa uma das mais avançadas no quesito normas relacionadas à qualidade no fornecimento de energia elétrica, utiliza a norma EN50160 que foi oficialmente adotada por vários países. Nos EUA, muitas concessionárias têm usado recomendações como a IEEE 519-1992 e IEEE 1159-1995 apenas como referência. No Brasil, houve a reestruturação do setor elétrico e o surgimento da ANEEL, em 1996, responsável pela regulamentação e fiscalização da energia elétrica.

As disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão em regime permanente foram regulamentadas inicialmente pela Resolução n.º 505 da ANEEL. Essa resolução considera que é indispensável para conceituação do fornecimento adequado, o estabelecimento de níveis de tensão bem como a definição dos limites de variação das tensões a serem observadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica. Em 2009, tal resolução fora substituída pelos chamados Procedimentos da Distribuição, ou PRODIST. Em seus Módulos 1 e 8, encontram-se as principais definições para o desenvolvimento desta pesquisa:

- Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica (DRC): indicador individual referente à duração relativa das leituras de tensão, nas faixas críticas, no período de observação definido. Expresso em percentual (%).
- Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária (DRP): indicador individual referente à duração das leituras relativas de tensão, nas faixas

de tensão precária, no período de observação definido. Expresso em percentual (%).

- Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Crítica (DRCM): percentual máximo de tempo admissível para as leituras de tensão, nas faixas de tensão críticas, no período de observação definido.
- Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Precária (DRPM): percentual máximo de tempo admissível para as leituras de tensão, nas faixas de tensão precárias, no período de observação definido.
- Tensão de atendimento (TA) ou Tensão de conexão: Valor eficaz de tensão no ponto de conexão, obtido por meio de medição, podendo ser classificada “Adequada”, “Precária” ou “Crítica”, de acordo com a leitura efetuada. Expresso em Volts (V) ou quilovolts (kV).
- Tensão Contratada (TC): valor eficaz de tensão que deverá ser informado ao consumidor por escrito, ou estabelecido em contrato. Expresso em Volts (V) ou quilovolts (kV).
- Tensão Nominal (TN): valor eficaz de tensão pelo qual o sistema é projetado. Expresso em Volts ou quilovolts (kV).
- Tensão de Leitura (TL): valor eficaz de tensão, integralizado a cada 10 (dez) minutos, obtido de medição por meio de equipamentos apropriados. Expresso em Volts ou quilovolts (kV).

O Módulo 8 (PRODIST, 2014), estabelece os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica, os critérios de medição, de registro e

dos prazos para compensação ao consumidor, caso as medições de tensão excedam os limites dos indicadores.

A conformidade da tensão elétrica refere-se à comparação da tensão medida em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos e é avaliada nos pontos de conexão à Rede Básica, à Rede de Distribuição, aos pontos de conexão entre concessionárias e também nos pontos de entrega de energia às unidades consumidoras (PRODIST, 2014).

Os limites, para pontos de entrega ou conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV, estão representados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Pontos de entrega ou conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.

Classificação da TA	Faixa de variação da TL em relação à TC
Adequada	$0,93 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
Precária	$0,90 TC \leq TL \leq 0,93 TC$
Crítica	$TL < 0,90 TC$ ou $TL > 1,05$

Os limites para pontos de entrega em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV encontram-se na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Limites para pontos de entrega em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV.

Tensão Nominal		Faixa de Valores Adequados das TL em relação à TN (V)	Faixa de Valores Precários das TL em relação à TN (V)	Faixa de Valores Críticos das TL em relação à TN (V)
Ligação	Tensão (V)			
Trifásica	220 127	$202 \leq TL \leq 231$ $117 \leq TL \leq 133$	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$ $(TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$
	380 220	$350 \leq TL \leq 399$ $202 \leq TL \leq 231$	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403)$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403)$ $(TL < 231 \text{ ou } TL > 233)$
Monofásica	254 127	$234 \leq TL \leq 267$ $117 \leq TL \leq 133$	$(221 \leq TL < 234 \text{ ou } 267 < TL \leq 269)$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$	$(TL < 221 \text{ ou } TL > 269)$ $(TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$
	440 220	$405 \leq TL \leq 462$ $202 \leq TL \leq 231$	$(383 \leq TL < 405 \text{ ou } 462 < TL \leq 466)$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$	$(TL < 383 \text{ ou } TL > 466)$ $(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Da Figura 2.1 é possível observar que a faixa considerada adequada para 127V varia entre 117V e 133V e a correspondente para 220V varia entre 202V e 231V. Fora da faixa considerada adequada, a concessionária passa a ser monitorada em tempo de transgressão, tanto para tensão crítica, quanto para precária. A partir de janeiro de 2015, esses limites foram revisados e ficaram mais rígidos para as concessionárias, conforme comparativo para a faixa de tensão 220/127V, na Figura 2.1 (PRODIST, 2014).

Figura 2.1 - Comparação dos limites de tensão para a faixa de tensão 220/127

As concessionárias distribuidoras de energia elétrica apuram os indicadores individuais, DRP e DRC, que por sua vez não podem ser superiores à DRPM e DRCM, pois estarão fornecendo serviço inadequado.

Considerando-se os indicadores individuais, o DRP é o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária, sendo definido em (2.1). Já o DRC é o índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica, definido em (2.2).

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \times 100 [\%] \quad (2.1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \times 100 [\%] \quad (2.2)$$

Onde nlp representa o número de leituras na faixa de tensão precária e n/c para a de tensão crítica.

O valor da Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Precária - DRPM fica estabelecido em 3.0%. O valor da Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Crítica - DRCM fica estabelecido em 0.5% (PRODIST, 2014).

Caso as medições de tensão, por reclamação ou amostrais, indiquem valor de DRP superior ao DRPM ou DRC superior ao DRCM, a distribuidora deverá compensar os consumidores ligados nesse ponto de conexão.

O valor da compensação é definido em (2.3)

$$\text{Valor} = \left[\left(\frac{\text{DRP} - \text{DRPM}}{100} \right) \cdot k_1 + \left(\frac{\text{DRC} - \text{DRCM}}{100} \right) \cdot k_2 \right] \cdot \text{EUSD} \quad (2.3)$$

Onde:

$k_1 = 0$, se $\text{DRP} \leq \text{DRPM}$;

$k_1 = 3$, se $\text{DRP} > \text{DRPM}$;

$k_2 = 0$, se $\text{DRC} \leq \text{DRCM}$;

$k_2 = 7$, para unidades consumidoras atendidas em Baixa Tensão, se $\text{DRC} > \text{DRCM}$;

$k_2 = 5$, para unidades consumidoras atendidas em Média Tensão, $\text{DRC} > \text{DRCM}$;

$k_2 = 3$, para unidades consumidoras atendidas em Alta Tensão, $\text{DRC} > \text{DRCM}$;

EUSD = valor do encargo de uso do sistema de distribuição referente ao mês de início da realização da medição pelo período mínimo de 168 horas.

$\text{DRPM} = 3\%$

$\text{DRCM} = 0,5\%$

Verifica-se que as compensações são mais severas para os clientes atendidos em baixa tensão, conforme evidenciado pelo constante k2.

A compensação é mantida até a regularização da tensão de fornecimento, ou seja, os indicadores DRP ou DRC não superam o DRCM ou DRPM.

Essa nova regra de compensação está vigente a partir de janeiro de 2015, com a vigência da revisão 5, do Módulo 8 (PRODIST, 2014).

Essa nova revisão exige mais da qualidade da tensão de regime permanente, pois a faixa de tensão adequada para os clientes de baixa tensão estão mais estreitas e ainda obriga que as distribuidoras atuem de forma preventiva para que a tensão de regime permanente fique dentro dos valores adequados, excluindo os prazos para a regularização da tensão de atendimento e consequente aplicação das compensações financeiras.

Na revisão anterior, vigente até 31/12/2014, havia um prazo para a regularização da tensão de atendimento. Se as medições de tensão, por reclamação ou amostrais, indicassem valor de DRP superior ao DRPM, 3%, a distribuidora tinha o prazo máximo de 90 dias. E quando indicava um valor de DRC superior ao DRCM, 0,5%, o prazo máximo era de 15 dias.

Transcorridos os prazos normais para a regularização da não conformidade, e não havido regularização dos níveis de tensão nos prazos vigentes, a distribuidora compensava as unidades consumidoras que estavam submetidas a tensões de atendimento com transgressão dos indicadores DRP ou DRC e aquelas atendidas pelo mesmo ponto de conexão (PRODIST, 2012).

2.3 Queda de tensão

A queda de tensão ao longo do alimentador pode ser aproximada conforme equação (2.4) (SHORT, 2014):

$$V_{queda} = |V_s| - |V_r| \approx I_R \cdot R + I_X \cdot X \quad (2.4)$$

onde:

V_{queda} : Queda de tensão ao longo do alimentador (V).

R : Resistência da linha (Ω).

X : Reatância da linha (Ω).

I_R : Corrente devida ao fluxo de potência ativa, em fase com a tensão (A).

I_X : Corrente devida ao fluxo de potência reativa, defasada em 90° em relação à tensão (A).

As correntes podem ser escritas em termos de fator de potência:

$$I_R = I \cdot fp = I \cdot \cos \theta \quad (2.5)$$

$$I_X = I \cdot fq = I \cdot \sin \theta = I \cdot \sin(\cos^{-1}(fp)) \quad (2.6)$$

onde:

I : Magnitude da corrente do alimentador (A).

fp : Fator de potência ativa.

fq : Fator de potência reativa.

θ : Ângulo entre a tensão e a corrente no alimentador.

A aproximação realizada em (2.4) apresenta boa precisão para a maioria das situações de distribuição, proporcionando erros menores que 1% para defasagens de até 8° entre a tensão enviada e a recebida.

Para fatores de potência elevados, a queda de tensão depende fortemente da resistência do alimentador. Com um fator de potência ativa de 0.95, por exemplo, o fator de potência reativa é de 0.31 e como para essas situações a resistência

normalmente é menor que a reatância, sendo que a resistência do alimentador apresenta o papel principal na queda de tensão.

Já para fatores de potência ativa de médio a baixo, a queda de tensão depende principalmente da reatância do alimentador. Por exemplo, com um fator de potência de 0.8, o fator de potência reativa é de 0.6 e com predominância da reatância sobre a resistência, para essas situações, as cargas reativas tornam-se as principais causadoras das quedas de tensão na linha.

Consequentemente, fatores pobres de potência ativa acabam por elevar a queda de tensão ao longo do alimentador. A queda de tensão é maior em sistemas de distribuição de baixa tensão, com fator de potência ativa pobre, circuitos fase-única e circuitos desbalanceados.

As principais medidas para se reduzir a queda de tensão são (SHORT, 2014):

- Elevar o fator de potência através da adição de banco de capacitores;
- Substituir o condutor atual por um de bitola maior;
- Balancear os circuitos, redistribuindo as cargas entre as fases;
- Converter as seções de fase-única para trifásicas;
- Reduzir a carga do circuito atual, redistribuindo as cargas entre outros circuitos adjacentes;
- Reduzir o comprimento do alimentador.

2.4 Abordagens convencionais para a regulação de tensão

Diversas estratégias podem ser adotadas para regular a tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica, muitas delas envolvem estudos de fluxos de

carga e compensação por queda de linha, considerando ou não o centro de carga (KULKARNI; UDUPI, 2010). Para manter o perfil de tensão dentro de limites especificados utiliza-se de dispositivos instalados na média tensão ao longo da rede de distribuição, que promovem a regulação da média tensão, como é o caso dos transformadores com comutação de taps, banco de capacitores e reguladores de tensão.

2.4.1 Modelagem por fluxo de carga

O estudo de fluxo de carga determina o estado da rede, avaliando a queda de tensão e a corrente nos circuitos de distribuição. A partir da modelagem das cargas e da rede de distribuição em regime permanente, o estudo busca melhorar o perfil de tensão e as condições de carregamento dos circuitos. Há diversos softwares que calculam o fluxo de carga em distribuição, indicando a tensão ao longo do sistema e auxiliando no planejamento da rede de distribuição.

Nesse estudo, consideram-se alguns patamares de carga para a simulação do fluxo de carga: carga leve, carga média e carga pesada. O período de tempo em que as características de consumo de energia elétrica tendem a ser semelhantes; o valor máximo de consumo, que é denominado de carga pesada, ocorre normalmente por volta das 19 horas e constitui a chamada ponta de carga, com cerca de 2 a 3 horas de duração; o valor mínimo de consumo, denominado de carga leve, dá-se por volta das 4 horas da madrugada; tem-se também um período de carga média ou intermediária. Podem ocorrer variações nos períodos de tempo de ocorrência da carga pesada e da carga leve de acordo com a região, os dias da semana e as estações do ano.

Para a maioria dos softwares de fluxo de carga, modela-se apenas a rede primária do alimentador, ou seja, a rede de distribuição em média tensão. A modelagem da rede secundária é empregada para problemas específicos dos consumidores.

Cargas desbalanceadas causam maiores quedas de tensão, pois a impedância vista por elas, incluindo a impedância de sequência zero, é maior que a impedância de sequência positiva vista pela carga balanceada. Assim, se a corrente fluir de forma desigual por fase, cargas pesadas irão proporcionar maiores quedas de tensão (KHATOR; LEUNG, 1997; SHORT, 2014).

As diversas abordagens para modelagem das cargas em um sistema de distribuição podem ser:

- Potência Constante: As potências ativas e reativas se mantêm constantes mesmo que a tensão mude. Caso a tensão diminua, a carga irá solicitar uma maior corrente, elevando-se a queda de tensão. Essa abordagem é utilizada para motores de indução.
- Corrente Constante: A corrente se mantém constante, mesmo que a tensão mude. A potência é elevada com a tensão. Se a tensão decai, a corrente drenada continua constante, diminuindo-se a potência, não alterando a queda de tensão.
- Impedância Constante: Para essa situação a impedância é constante, mesmo que a tensão mude. A potência aumenta com o quadrado da tensão. Se a tensão decai, a corrente decai linearmente, diminuindo-se a queda de tensão. Essa abordagem é interessante para cargas puramente resistivas.

É comum modelar os circuitos de distribuição como sendo de 40% a 60% de potência constante e de 40% a 60% de impedância constante. Modelar todas as cargas como sendo de corrente constante é uma boa aproximação para a maioria dos circuitos. Modelar todas as cargas como sendo de potência constante conserva a queda de tensão. Na Tabela 2.3 encontram-se diversas configurações de cargas para aproximações na simulação de fluxo de carga (WILLIS, 1997).

Tabela 2.3 – Principais metodologias de modelagem por fluxo de carga.

Tipo do Alimentador	Potência Constante (%)	Impedância Constante (%)
Residencial e comercial (Pico do verão)	67	33
Residencial e comercial (Pico do inverno)	40	60
Urbano	50	50
Industrial	100	0
Países em Desenvolvimento	25	75

Fonte: Wills, H. L. "Characteristics of Distribution Loads".

2.4.2 Compensação por queda de tensão na linha

O compensador por queda de linha ou LDC (*Line-Drop Compensation*) tem como objetivo principal manter a tensão constante, não no barramento secundário do transformador, mas no ponto de entrega do consumidor (CHOI, 2001; SHUANGPING ZHANG et al. 2010).

Se for considerar uma rede sem a utilização do LDC, ao final do alimentador haverá uma variação de tensão que dependerá da impedância do alimentador para uma condição de carga pesada, e da variação da corrente de carga para uma condição de carga leve.

Com a utilização da compensação por queda de linha, diminui-se a variação da tensão ao final do alimentador por meio da elevação da tensão na saída do equipamento de regulação.

Transformadores com comutação de tap e reguladores de tensão durante a carga pesada, elevam a tensão ao máximo; ao passo que na carga leve, diminuem a tensão ao mínimo. O LDC utiliza um modelo interno de impedância do alimentador de distribuição para encontrar a impedância da linha. Na Figura 2.2 pode-se visualizar o circuito básico de um LDC. O usuário pode ajustar os valores de R e X no compensador para melhorar a compensação.

O controlador ajusta o tap baseado na tensão do relé regulador de tensão, que é a tensão do TP adicionado com a tensão do circuito compensador de queda de linha. Se não há compensação por queda de linha, o relé regulador ajusta o tap com base nas informações do TP (SHORT, 2014).

Figura 2.2 - Circuito de compensação de queda de linha.

Em uma linha de distribuição típica, os compensadores R e X são escolhidos para que a máxima elevação de tensão seja obtida sob carga pesada, enquanto que a tensão mínima seja obtida para a carga leve. Pode-se utilizar o centro de carga para se ajustar os parâmetros do regulador para cada ponto de regulação de tensão dado. Os parâmetros R e X também podem ser alterados com base no “*Spread de*

Tensão” para a tensão desejada, dentro da banda de operação, tanto para carga leve quanto para pesada.

O que dificulta a aplicação desses dois métodos é o fato dos fatores de potência mudarem, principalmente em situações de retirada de bancos de capacitores do sistema.

A compensação por queda de linha produz menores flutuações de tensão para os consumidores ao longo do alimentador.

O caminho clássico para se ajustar o LDC é utilizar o método do Centro de Carga. Considera-se que a linha tenha impedâncias R_L e X_L e uma carga sem seu final. Os parâmetros R_{ajuste} e X_{ajuste} do regulador podem então ser encontrados por meio das seguintes expressões:

$$R_{ajuste} = \frac{I_{TC}}{N_{TP}} \cdot R_L \quad (2.7)$$

$$X_{ajuste} = \frac{I_{TC}}{N_{TP}} \cdot X_L \quad (2.8)$$

onde:

- $R_{ajuste} \rightarrow$ Ajuste do regulador para compensação resistiva (V).
- $X_{ajuste} \rightarrow$ Ajuste do regulador para compensação reativa (V).
- $I_{TC} \rightarrow$ Valor do primário do transformador de corrente (A).
- $N_{TP} \rightarrow$ Razão de transformação do transformador de potencial (tensão no primário / tensão no secundário).
- $R_L \rightarrow$ Resistência da linha para o ponto de regulação (Ω).

- $X_L \rightarrow$ Reatância da linha para o ponto de regulação (Ω).

Na Figura 2.3 se pode visualizar o efeito das flutuações de tensão com e sem a atuação do LDC.

Figura 2.3 – Perfis de tensão com e sem atuação do LDC.

A tensão de ajuste ou referência, representada por V_{ajuste} , é valor de tensão que deve ser fornecido pela subestação (fonte) para que o consumidor receba uma tensão nominal dentro dos limites operativos. Para a situação onde a tensão de ajuste é de 120 V e não há compensação, pode-se contemplar a variação de tensão que ocorre ao longo da linha para a carga pesada. Já para a carga leve esta flutuação não é tão grande; no entanto, é necessária a presença de vários reguladores ao longo do alimentador para atender os consumidores.

Para a situação em que a tensão de ajuste é de 126 V, assume-se uma postura de elevar a tensão no secundário para que ao fim do alimentador seja entregue ao consumidor a tensão contratada. Essa tensão maior é observada tanto

em carga pesada quanto em carga leve. Com a utilização do LDC, a tensão em carga leve não será mais tão elevada, fazendo assim que os consumidores mais próximos da subestação não sofram com sobretensões em situações fora da carga pesada. Tanto a estratégia de deixar a tensão do secundário mais elevada quanto o LDC permitem um menor uso de reguladores de tensão ao longo do alimentador, mas estão sujeitas às regulamentações sobre níveis de tensão não operativos (PRODIST, 2014).

O método de compensação por queda de linha funciona perfeitamente para uma carga ao final da linha. Caso existam cargas distribuídas uniformemente ao longo do alimentador, com uma impedância de linha também uniforme, pode-se manter a tensão constante no ponto médio do alimentador.

Para isso, deve-se então ajustar a compensação utilizando-se a “Regra dos 3/8” da impedância total da linha (SHORT, 2014). Um circuito com uma carga uniformemente distribuída tem uma queda de tensão na extremidade do alimentador igual à metade da que ocorreria caso todas as cargas fossem modeladas como uma só carga ao final da linha. A compensação segura é possível apenas para certa quantidade, pois sobretensões ocorrerão caso uma compensação excessiva seja realizada pelo regulador.

A tensão do relé regulador não pode ficar acima dos limites. A tensão máxima pode ser calculada segundo Equação 2.9:

$$V_{max} = V_{ajuste} + (fp \cdot R_{ajuste} + fq \cdot X_{ajuste}) \cdot I_{max} \quad (2.9)$$

onde:

- V_{ajuste} → Tensão ajustada do regulador (V).

- $R_{ajuste} \rightarrow$ Ajuste do regulador para compensação resistiva (V).
- $X_{ajuste} \rightarrow$ Ajuste do regulador para compensação reativa (V).
- $fp \rightarrow$ Fator de potência ativa.
- $fq \rightarrow$ Fator de potência reativa.
- $I_{max} \rightarrow$ Máxima corrente de carga em p.u. relativa ao TC do regulador.

Assim, pode-se ajustar R_{ajuste} e X_{ajuste} para atingir os limites desejados.

De maneira simplificada, a queda de tensão nos alimentadores é refletida no relé de controle de tensão como sendo a relação entre a variação de tensão no barramento regulado da subestação e a variação da somatória das correntes de carga dos alimentadores. Essa relação define a impedância réplica, equivalente a um centro de carga fictício. Assim, para uma condição de carga pesada (Figura 2.4), tem-se (SHORT, 2014):

$$Z \cdot I_{CP} = V_{CP} - V_{REG} \quad (2.10)$$

onde:

- $V_{CP} \rightarrow$ Tensão em carga pesada.
- $I_{CP} \rightarrow$ Corrente em carga pesada.
- $V_{REG} \rightarrow$ Tensão regulada.
- $Z \rightarrow$ Impedância réplica.

Figura 2.4 – Centro de carga para uma condição de carga pesada.

Já para uma condição de carga leve (Figura 2.5), obtém-se (SHORT, 2014):

$$Z \cdot I_{CL} = V_{CL} - V_{REG} \quad (2.11)$$

onde:

- $V_{CL} \rightarrow$ Tensão em carga leve.
- $I_{CL} \rightarrow$ Corrente em carga leve.

Figura 2.5 – Centro de carga para uma condição de carga leve.

Subtraindo (2.11) de (2.10) tem-se:

$$Z(I_{CP} - I_{CL}) = V_{CP} - V_{CL} \quad (2.12)$$

$$Z = \frac{V_{CP} - V_{CL}}{I_{CP} - I_{CL}} = \frac{\Delta V}{\Delta I} [\Omega] \quad (2.13)$$

Na prática, considera-se a tensão em carga leve como sendo a tensão nominal e a corrente em carga leve como sendo nula, ou seja:

$$Z = \frac{V_{CP} - V_N}{I_{CP}} \quad (2.14)$$

A impedância encontrada em (2.14), por meio do centro de carga fictício, fornece subsídios para o cálculo dos parâmetros R_{ajuste} e X_{ajuste} de regulação do LDC, os quais foram vistos anteriormente.

2.4.3 Dispositivos de controle de tensão

Essa subseção foi fortemente fundamentada na dissertação de (SPATTI, 2007). Maiores detalhes podem ser conferidos nessa referência.

As cargas ligadas à rede de distribuição de energia elétrica variam no decorrer do dia devido principalmente às manobras e oscilações na demanda de consumo. Assim como a carga, a tensão fornecida pela empresa distribuidora também varia.

Para isso, medidas de controle dessa grandeza, tensão de regime permanente, são realizadas para manutenção da mesma dentro de limites especificados pela legislação.

Por abordagem convencional cita-se o controle de tensão por comutação de derivação em transformadores e em reguladores de tensão de linha. Também podem ser considerados os bancos de capacitores, que fazem o controle do fator de potência. Essas alternativas realizam o controle de tensão na média tensão, porém

podem não ser eficazes para manter a tensão na rede secundária dentro dos valores adequados, ou seja, nos clientes ligados na baixa tensão do transformador de distribuição. Esses métodos são utilizados pela maioria das distribuidoras de energia elétrica.

A interação entre esses dispositivos pode ser controlada em tempo real ou por meio de pré-programação. As seções a seguir apresentam detalhadamente os dispositivos usados no controle de tensão dentro da rede de distribuição de energia elétrica.

a) Banco de capacitores

A utilização dos bancos de capacitores nos sistemas de distribuição promove o controle do fator de potência através da compensação da potência reativa indutivas de motores ou outras cargas com baixo fator de potência. Ao realizar essa compensação, há também a diminuição das perdas, visto que a corrente no alimentador reduz também.

Os capacitores também promovem a elevação da tensão no alimentador, reduzindo parte das perdas produzidas pelas cargas do sistema (SHORT, 2014). O controle de tensão pelos capacitores é realizado e acompanhado apenas na média tensão.

Em sistemas de distribuição podem-se empregar capacitores tanto no barramento de 13,8kV da subestação como ao longo dos alimentadores, conforme ilustrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Capacitores instalados ao longo do alimentador e no barramento 13,8kV da subestação.

Os capacitores $C_1, C_2, \dots, C_N$, instalados ao longo do alimentador tem o objetivo de compensar reativos na linha. Já os capacitores instalados na barra da subestação (C_{shunt}) compensam reativos em todo o sistema e elevam o fator de potência da subestação.

Os capacitores instalados ao longo do alimentador e no barramento secundário da subestação pode ter sua operação diária acompanhada por sistemas supervisórios remotos ou por controladores locais.

Os métodos utilizados para a inserção e controle de capacitores em sistemas de distribuição podem utilizar técnicas convencionais, como relatadas por (SHORT, 2014) ou mesmo técnicas inteligentes como aquelas apresentadas por (SUNDHARARAJAN; PAYWA, 1994), (CHOI; KIM, 2001), (SANTOSO; TAN, 1990) e (RANAMUKA; AGALGAONKAR; MUTTAGI, 2014).

b) Regulador de tensão de linha

Os reguladores de tensão de linha também são conhecidos por autotransformadores. Eles possuem um enrolamento em série com o outro e possuem uma faixa de ajuste que permite regular a tensão em sua saída de -10% a +10%, em relação à tensão de entrada.

Esses equipamentos elevam a tensão ao longo do alimentador, diminuindo a flutuação de tensão no consumidor, provocada pela variação da carga ao longo do dia. São instalados ao longo do alimentador e em pontos definidos a partir de um estudo de fluxo de potência. Podem ser instalados até 2 equipamentos em série no mesmo alimentador, conforme ilustrado na Figura 2.7. Os reguladores possuem várias entradas, permitindo a configuração do número de enrolamentos de acordo com a variação da tensão (SHORT, 2014).

Figura 2.7 – Reguladores de tensão instalados ao longo do alimentador

O ajuste é feito por meio de uma chave rotatória ou um comutador de tap. Neste dispositivo o enrolamento primário se encontra em paralelo com a linha e, o secundário, em série com a linha. O enrolamento em série possui taps que permitem

que a tensão possa ser somada ou subtraída à tensão do primário. Isto resulta em valores de tensão que se mantêm aproximadamente constantes mesmo que a tensão do primário varie (PANSINI, 2000).

Se nenhum regulador estiver instalado ao longo da linha, a queda de tensão máxima deve estar dentro da faixa de operação do transformador da subestação. Na Figura 2.8 se pode verificar a ação de um regulador instalado ao longo da linha de um sistema de distribuição.

Figura 2.8 – Alimentador de distribuição com e sem regulador de tensão.

Em um alimentador de distribuição sem regulador de tensão, o ponto de queda de tensão representa o local em que a subestação já não é mais capaz de compensar a queda de tensão na linha. Para que a tensão não fique fora dos níveis operativos, a partir deste ponto, é então necessária a instalação de um regulador, que irá elevar os níveis de tensão novamente para os níveis operativos (SHORT, 2014).

Com um regulador instalado ao longo do alimentador, pode-se cobrir até duas vezes a queda de tensão suportada pelo primário. Similarmente, com dois

reguladores pode-se cobrir até três vezes a máxima queda de tensão do primário e assim sucessivamente, porém as distribuidoras procuram trabalhar com apenas 2 reguladores em série.

Para cargas uniformemente distribuídas ao longo do alimentador, pode-se empregar a “Regra dos 3/8” e instalar o regulador a 3/8 da distância da subestação. Para dois reguladores, pode-se instalar o primeiro a 20% da distância da subestação e o segundo a 50% da distância da subestação (SHORT, 2014).

A instalação de reguladores ao longo do alimentador cabe à equipe de planejamento do sistema de distribuição, que deve estudar o ponto do alimentador onde a subestação já não pode mais compensar a queda de tensão, através do estudo de fluxo de carga. Um regulador monofásico ANSI tipo A possui 3 buchas: *Fonte*, *Carga* e *Fonte-Carga*, conforme pode ser visto na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Regulador monofásico ANSI tipo A.

O enrolamento série encontra-se entre a *Fonte* e a *Carga*, com o tap do lado da carga.

Reguladores trifásicos, geralmente utilizados em subestações, controlam as três fases simultaneamente. Eles podem ter conexões Estrela com Terra, Triângulo Fechado e Triângulo Aberto, conforme pode ser visto na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Conexões trifásicas para o autotransformador.

Na configuração Estrela com Terra a 4 condutores, geralmente utiliza-se 3 reguladores monofásicos, que conectam a linha ao neutro. Cada regulador controla independentemente a tensão, melhorando o controle do sistema desbalanceado.

Na configuração Triângulo Fechado, três reguladores estão conectados fase a fase. Esse arranjo permite um acréscimo na faixa de regulação passando de $\pm 10\%$ para $\pm 15\%$.

Na configuração Triângulo Aberto, apenas dois reguladores monofásicos são necessários, conectando uma fase a outra.

c) Transformadores com comutação de tap

As cargas conectadas com a rede de distribuição variam durante todo o dia, o que causa variações de tensão. Se for incontrolada, é inaceitável essa variação para os consumidores. Para prevenir tal fato, os transformadores em subestações

primárias são geralmente colocados com comutador de tap sob carga (OLTC) (SHORT, 2014).

Os transformadores que provêm um pequeno ajuste de magnitude de tensão, usualmente numa faixa de $\pm 10\%$, e/ou que mudam o ângulo de fase da tensão de linha, são importantes componentes do sistema de potência. Alguns transformadores regulam tanto a magnitude como o ângulo de fase.

Os transformadores provêm de tap para variar a relação entre o número de enrolamentos do primário e secundário através de uma chave. O controle dessa chave é feito pela análise da tensão de entrada visando manter a saída em um nível constante e mais próximo à referência.

Uma comutação de tap pode ser realizada enquanto o transformador está energizado. Essa operação é denominada “*Load Tap Changer*” (LTC).

Cada comutador de tap tem associado um relé regulador automático de tensão (conhecido como relé 90), que monitora a tensão do secundário do transformador e comanda as operações de comutação de tap como desejado. Essa comutação é automática e operada por motores que respondem ao comando desse relé para ajustar a tensão dentro de um nível especificado. Circuitos especiais mostram a comutação a ser feita sem a interrupção da corrente. A banda morta é inclusa e deve ser ajustada para ser levemente maior que o tamanho do passo do transformador para prevenir oscilações abruptas. Na prática, o retardo de tempo é incluso para prevenir o uso desnecessário devido à alta frequência de comutações de tap.

Figura 2.11 – Esquema do relé regulador automático de tensão.

O mais simples arranjo de controle de tensão introduzido na Figura 2.11 é muito robusto. Não existe motivo para ele ser afetado por mudanças em fator de potência ou mesmo uma reversão de potência reativa (SIMAS FILHO, 2004). O fator limitante é que o esquema da Figura 2.11 não considera a queda de tensão ao longo do alimentador e também a operação em paralelo de transformadores.

Os controles de tensão empregados na prática são mais complexos do que o esquema da Figura 2.11. Uma dessas considerações práticas é levar em conta a queda de tensão ao longo do alimentador, como descrito acima, através da estratégia de LDC.

Como visto anteriormente, o objetivo da compensação de queda de linha é manter a tensão nos consumidores dentro de uma faixa aceitável.

A Figura 2.12 indica uma corrente proporcional para a corrente de carga que flui através de uma impedância equivalente ($Z_{eq} = R + j.X$). A tensão dos componentes R e X é deduzida da tensão do barramento secundário da subestação primária para dar um sinal de resposta de tensão à carga remota.

Os valores de R e X dentro do relé são ajustados de forma a corresponder diretamente às impedâncias R_L e X_L da linha real.

Figura 2.12 – Esquema do relé regulador de tensão com LDC.

O regulador de tensão possui basicamente 3 ajustes:

- Tensão Regulada: Também chamada de ponto de ajuste ou centro de banda. É a tensão desejada na saída do regulador.
- Largura de Banda: São os limites inferior e superior os quais a tensão do regulador deve obedecer.
- Retardo de Tempo: Tempo de espera para se iniciar uma comutação de tap a partir do momento em que a tensão do regulador extrapola os limites estabelecidos. Esse ajuste permite evitar que o regulador atue em variações curtas de tensões.

Esses ajustes estão graficamente representados na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Controles do relé regulador de tensão.

Um retardo de tempo elevado ou uma grande largura de banda diminuem o número de comutações, mas a regulação de tensão fica comprometida. Uma largura de banda estreita ou um baixo retardo de tempo melhoram o perfil de tensão, mas acarretam maiores comutações do tap e seu consequente desgaste.

Os reguladores de tensão possuem contadores de operações que auxiliam a equipe de manutenção a identificar a melhor hora para se realizar a manutenção do dispositivo ou sua troca. Os reguladores são concebidos para aproximadamente 1 milhão de operações em sua vida útil. Em condições normais são realizadas 70 comutações de tap por dia, um total de 25 mil por ano (SEN; LERSON, 1994). Caso o número de comutações por dia seja excessivo, o contador de operações também pode ser útil, indicando que algum parâmetro está regulado de forma errada ou estão ocorrendo flutuações de tensões no primário (LIANG; WANG, 2003).

O comutador de tap do transformador faz a correção da tensão na saída do alimentador, os reguladores de tensão e os bancos de capacitores em conjunto com o comutador de tap fazem a regulação da tensão na média tensão. Esses equipamentos são responsáveis para que a tensão chegue adequada no final do alimentador. Porém, podem não ser eficientes para o adequado controle da tensão

na rede secundária. Muitas vezes, a tensão no transformador de distribuição está adequada, mas devido à característica da rede secundária, a tensão de entrega nos clientes conectados nessa rede não ficará dentro dos níveis adequados.

2.5 Abordagens inteligentes para o controle de tensão

2.5.1 Introdução

Com o crescimento da indústria foi necessário o desenvolvimento de sistemas de distribuição e transmissão capazes de fornecer uma variedade grande de níveis de tensão para diversos tipos de consumidores. A qualidade no fornecimento da energia elétrica passou então a ser uma exigência desses consumidores. Com isso, a manutenção da tensão dentro de perfis aceitáveis se tornou alvo de atenção dos profissionais da área.

O controle de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica é usado para manter o perfil de tensão dentro de limites especificados. Desta maneira, tem-se a redução de perdas, minimização do problema de instabilidade de tensão e eliminação da violação de tensão para a concessionária distribuidora de energia elétrica (PAL; NATH, 2010).

Para manutenção da tensão dentro de determinados limites operacionais são necessárias medidas de controle e de acompanhamento dos agentes de fiscalização como das concessionárias de energia. Isto se deve porque os sistemas elétricos de distribuição estão sujeitos a variações de tensão. Esse problema

relacionado ao fornecimento de energia pode comprometer o funcionamento correto dos equipamentos elétricos pertencentes aos consumidores.

Para manter o perfil de tensão dentro de limites especificados utiliza-se de diversas estratégias para regular a tensão. As principais são:

- Comutação de tap em transformadores na subestação.
- Utilização de bancos de capacitores no barramento da subestação e/ou nos alimentadores.
- Utilização de reguladores de tensão ao longo dos alimentadores.

As estratégias de controle de tensão se fundamentam na injeção ou retirada de potência reativa no sistema e também pela mudança no nível da tensão do secundário por meio de comutação de tap em transformadores ou autotransformadores (MIRANDA; MOREIRA; PEREIRA, 2007).

A mudança de tap em transformadores da subestação de distribuição é realizada por um relé denominado Regulador Automático de Tensão (AVR) que também tem a função de comando, controle e monitoração da tensão.

As estratégias de controle podem aparecer nos sistemas de distribuição de forma combinada ou atuando individualmente na regulação da tensão. Tal controle para sistemas de distribuição é dividido em duas categorias:

- Controle *off-line*.
- Controle em tempo real.

A primeira categoria de controle é feita através da previsão de carga para o próximo dia. A partir disso, obtém-se o despacho otimizado para a operação dos dispositivos ao longo do sistema.

No controle *off-line* utilizam-se frequentemente métodos de programação dinâmica (PD), pois devido à natureza não linear dos problemas, fica extremamente complexa a utilização de alguns métodos *on-line*. Porém essa técnica exige grande esforço computacional. Uma forma de minimizar esse problema é dividi-lo em subproblemas. De uma maneira geral, o controle *off-line* faz uma programação futura da operação dos dispositivos reguladores de tensão. Essa coordenação ótima, também designada como despacho ótimo, proporciona redução nas operações de comutação de tap bem como a melhor utilização dos bancos de capacitores no sistema.

Por outro lado, o controle em tempo real requer respostas com restrições temporais o que exige um elevado nível de automação nas subestações, cenário inexistente no Brasil dentro das concessionárias de distribuição de energia. Além disso, é muito complexo para o controle em tempo real considerar o carregamento diário e sua respectiva medida de controle de tensão através dos dispositivos especialistas.

Os trabalhos científicos (LIU; ZHANG; QIU, 2002), (HSU; LU, 1998) e (LIANG; WANG, 2003) mostram o controle de tensão em tempo real em nível de distribuição de energia.

Nas seções seguintes serão apresentadas em detalhes algumas das principais estratégias para melhoria do perfil de tensão secundária de subestações de distribuição de energia elétrica fundamentadas em técnicas recentes. Dentre estas técnicas, serão destacados os Sistemas Fuzzy devido aos promissores resultados apresentados por essas abordagens e relatados junto à bibliografia correlata.

2.5.2 Controle ótimo de volt/var em sistemas de distribuição utilizando programação dinâmica e sistemas fuzzy

Nesta seção será descrita uma metodologia de controle *off-line* de tensão em sistemas de distribuição. Empregou-se uma estratégia híbrida de Programação Dinâmica (PD) com teoria de controle Fuzzy para melhorar o perfil de tensão e diminuir perdas de potência. O trabalho de (LIU; ZHANG; QIU, 2002) propõe o despacho ótimo dos dispositivos de controle de tensão através da previsão de carga de curtíssimo prazo, ou seja, a operação ótima desses equipamentos.

O sistema completo foi dividido em dois subproblemas: o do lado da subestação, onde o controle da tensão é feito por meio de comutação de tap do transformador e banco de capacitores e o do lado dos alimentadores, onde a queda de tensão da linha e o fator de potência são compensados por meio de banco de capacitores ao longo do alimentador.

Para resolver o subproblema da subestação utiliza-se a PD, ao passo que o subproblema dos alimentadores emprega-se um controlador Fuzzy.

Os dois algoritmos são coordenados por meio da realização de fluxo de carga, checando se o problema total foi otimizado. O sistema leva em consideração os limites de tensão da barra como também o número de operações de comutação de tap e chaveamento de bancos de capacitores.

Para simplificar o problema, considerou-se que o sistema de distribuição possuía apenas dois alimentadores, com 17 possíveis níveis de tap (-10% a +10%). Na Figura 2.14 pode-se visualizar a representação do sistema estudado.

Figura 2.14 – Diagrama esquemático do sistema estudado.

No subproblema do lado da subestação existem 17 possibilidades para o tap e 4 possibilidades para os bancos de capacitores, portanto, existem 68 (17×4) estados possíveis. Ao longo de 24 horas, para encontrar a solução ótima desse subproblema, são necessários 1632 (24×68) cálculos de fluxo de carga no sistema de distribuição. Utilizou-se um fluxo de carga de varredura do tipo back/forward.

Para reduzir o esforço computacional, primeiramente obtém-se a posição ideal do tap, restando então apenas 3 posições que estarão próximas da ideal. Logo, o número total de combinações possíveis de estados é reduzido para 12 (3×4). Consequentemente, o esforço computacional do lado da subestação diminui. Essa técnica é chamada de Programação Dinâmica Simplificada.

Já o subproblema do lado dos alimentadores consiste de manipular banco de capacitores para compensar as perdas ativas ao longo da linha e melhorar o perfil de tensão. O controlador Fuzzy é empregado nessa estratégia para encontrar os estados dos bancos de capacitores. Para resolver esse subproblema, utiliza-se do desvio de tensão e do fator de potência como apoio à tomada de decisão. Por meio

de regras linguísticas do tipo “Se-Então”, mapeia-se o comportamento dos estados dos bancos de capacitores ao longo do alimentador.

Os resultados mostraram que houve melhoria no perfil de tensão e redução significativa nas perdas. O custo computacional também foi reduzido utilizando-se a Programação Dinâmica Simplificada.

O método desenvolvido mostrou-se eficiente e passível de ser aplicado na prática. A utilização das ações combinadas de um controlador Fuzzy, para capacitores ao longo dos alimentadores; e Programação Dinâmica, para gerenciar as operações de comutação de tap e banco de capacitores na barra, tornou o método proposto bastante flexível.

Para métodos convencionais, em um sistema real de larga escala com um grande número de capacitores nos alimentadores, a necessidade de memória computacional cresce rapidamente e proibitivamente bem como o tempo de processamento.

Para o método proposto, a utilização de um controlador Fuzzy para o banco de capacitores ao longo dos alimentadores permite que o tempo de processamento cresça de forma amena, sendo o grande diferencial desse método.

2.5.3 Sistema híbrido para controle de tensão e potência reativa em sistemas de distribuição

O propósito do controle de tensão e potência reativa em uma subestação de distribuição, proposto por (HSU; LU, 1998) é controlar a tensão no barramento secundário e o fluxo de potência reativa sobre o transformador principal. A tensão do secundário do barramento do transformador principal de uma subestação de

distribuição geralmente é regulada por um relé Regulador Automático de Tensão (AVR) através do comutador de tap em transformador (LTC).

Para reduzir o número de comutações do tap e atingir uma melhor regulação de tensão, um condensador estático (STATCON) foi implementado na subestação de distribuição para coordenar as operações de chaveamento dos capacitores e LTC.

Na Figura 2.15 pode-se visualizar a configuração do sistema de distribuição estudado.

Figura 2.15 – Sistema de distribuição 69 /11,4 kV – Taiwan Power Company.

O transformador principal é equipado com LTC para sustentar a tensão do barramento secundário próxima da tensão nominal. Utiliza-se um capacitor shunt na barra de 11,4 kV para compensar o fluxo de potência reativa através do transformador principal. Usa-se dos dados de corrente fornecidos pela Taiwan Power Company (TPC) para ligar ou desligar os capacitores de acordo com a demanda de potência reativa do sistema, tal que seja minimizado o fluxo de potência

reativa no transformador principal. Assim, o controle de tensão e potência reativa em uma subestação de distribuição pode ser alcançado mudando-se o estado on/off do capacitor ou ajustando a posição do tap.

Faz-se necessário então uma coordenação entre o chaveamento do capacitor e a comutação do tap para que um controle de tensão e de potência reativa seja satisfatoriamente implementado.

Os principais objetivos a serem alcançados nesta aplicação foram:

- A tensão do barramento do secundário deve ser mantida o mais próximo possível do valor especificado para todas as horas do dia.
- O fator de potência do transformador principal deve ser o maior possível.
- O número de comutações do tap e chaveamentos do capacitor deve ser o mínimo possível.

Como observado, os objetivos são definidos em termos de expressões linguísticas.

Quanto aos limites de operação, o número de movimentos de tap deve ser inferior a 30 e o de chaveamentos de capacitores deve ser inferior a 6. Além disso, os limites operativos do transformador principal e do barramento secundário devem ser respeitados.

O sistema híbrido proposto, representado pela Figura 2.16 e disponível por (LIANG; WANG, 2003) pode ser dividido em dois passos. Primeiro, a Rede Neural Artificial (RNA) é alimentada com as informações de potência ativa e reativa do transformador principal, além das tensões de primário e secundário, fornecendo então na saída um despacho programado preliminar para o estado do capacitor e LTC.

O segundo passo consiste em refinar as informações vindas do passo anterior, utilizando-se Programação Dinâmica Fuzzy, promovendo assim um despacho programado final.

Figura 2.16 – Diagrama de execução do método proposto.

Foi utilizada uma rede *FeedForward* multicamadas, cuja topologia consiste de 5 variáveis de entrada (sendo uma o Bias), 11 neurônios na camada escondida e 2 neurônios na camada de saída. Essa topologia foi a que apresentou os melhores resultados no processo de treinamento, que avaliou 24 RNAs, uma para cada hora do dia. Cada RNA foi treinada utilizando os dados de uma hora específica do dia para se gerar o despacho programado preliminar do capacitor e do LTC, para cada hora. Um caminho também seria utilizar uma única RNA pra todas as horas do dia, mas os resultados obtidos não foram promissores.

O despacho programado preliminar produzido pela RNA enfrenta dois problemas principais. O primeiro é o fato da saída da rede apresentar valores reais entre 0 e 1, no entanto os valores desejados para posições do tap são inteiros entre -8 e 8, e o status do capacitor assume ou 0 ou 1. Faz-se então necessário converter as saídas reais da RNA para os valores inteiros de interesse para posições do tap e estado do capacitor.

Outro problema é o fato da RNA ter sido treinada para uma hora específica. Isso significa que para se realizar o despacho programado para as 24 horas do dia são necessárias 24 RNA's diferentes. Assim, podem ocorrer demasiadas comutações do tap e chaveamentos do capacitor, superando os limites descritos anteriormente, para casos mais graves.

A posição do capacitor é considerada 1 quando a saída real da rede for maior ou igual a 0.95, e 0 para saídas menores ou iguais a 0.05. Para outros valores, a posição do capacitor é indeterminada.

Em resumo, pode existir um valor para a posição do capacitor no caso determinado e dois para o caso indeterminado. Em relação às posições do tap, podem existir dois ou três valores para o despacho programado preliminar.

Portanto, o despacho preliminar gera 6 possíveis estados para cada hora. Deseja-se refinar os resultados da etapa preliminar, reduzindo o número de estados possíveis para que se possam atingir os objetivos descritos anteriormente.

Para tal utiliza-se a Programação Dinâmica Fuzzy, pois a PD convencional suporta apenas expressões matemáticas. Dado que o comportamento do sistema foi definido em termos de expressões linguísticas, os autores propuseram a utilização da PD Fuzzy para realizar o despacho programado final, com base nas informações vindas do despacho preliminar.

Os resultados obtidos pelos autores mostraram que a abordagem híbrida com Redes Neurais e Programação Dinâmica Fuzzy mostrou-se satisfatória para o controle de potência reativa e tensão, mantendo a tensão dentro da faixa de 0.975 p.u. e 1.007 p.u. e o fator de potência acima de 0.912.

2.5.4 Controlador Fuzzy e Annealing simulado para controle de volt/var em sistemas de distribuição

A proposta de se investigar o controle de tensão e potência reativa em (LIANG; WANG, 2003) é encontrar um despacho ótimo para o comutador de tap do transformador (LTC) e o estado do capacitor no sistema estudado, por algumas horas no futuro.

As considerações práticas para estratégias de controle de tensão e potência reativa devem ter os seguintes objetivos:

- O desvio de tensão no barramento secundário deve ser mantido “tão pequeno quanto possível”.
- O fluxo de potência reativa através do transformador deve ser mantido “tão pequeno quanto possível”.
- A perda real total nos alimentadores deve ser mantida a “tão pouco quanto possível”.
- O número de comutações de tap e operações de chaveamento de capacitores deve ser “a menor possível”.

Esses objetivos possuem imprecisão, pois são modelados por meio de expressões linguísticas como “tão pequeno quanto possível”, que obviamente não podem ser tratadas por um algoritmo de otimização numérico.

A utilização então de Sistemas Fuzzy permite realizar um controle de tensão e de potência reativa em um sistema de distribuição levando-se em consideração os objetivos apresentados anteriormente. Uma técnica de Annealing é empregada para acelerar a resolução do problema.

Primeiro, a função objetivo é formulada por meio de Sistemas Fuzzy. Então, o algoritmo de Simulação de Annealing, que é um método para otimização combinatorial, é empregado para resolver o problema e encontrar um despacho programado ótimo para o LTC e o estado do capacitor em um dia.

A vantagem da Simulação de Annealing é permitir que um valor de energia mais elevado escape da convergência de um mínimo local enquanto o mínimo global é alcançado. Como a técnica de Annealing convencional exige certo tempo para encontrar uma solução, apenas uma variável de controle foi perturbada para se encontrar uma nova solução, encontrando uma solução ótima mais rapidamente.

O sistema de distribuição estudado está representado pela Figura 2.17.

Figura 2.17 – Sistema simplificado para estudo do método.

O sistema em questão consiste de um barramento primário de 69 kV, um secundário de 11,4 kV, um transformador principal de 25 MVA com LTC e controle automático de tensão (AVR), 5 alimentadores e suas respectivas proteções. O capacitor C_{shunt} é utilizado para compensar o fluxo de potência reativa através do

transformador e elevar a eficiência do sistema. Os capacitores C_{1-10} instalados ao longo do alimentador são utilizados para melhorar o perfil de tensão e reduzir as perdas.

Segundo a TPC, o número máximo de comutações de tap permitidas para o dia é de 30. Já o capacitor shunt e os capacitores ao longo do alimentador podem ser chaveados 6 e 4 vezes, respectivamente. São 17 posições possíveis para o tap, variando de -8 a +8.

O método da Simulação de Annealing será empregado para refinar a saída do Sistema Fuzzy. As variáveis de controle para cada hora incluem 1 posição para o tap e 11 status para capacitores, totalizando 12 variáveis. Assim, para 24 horas devem ser solucionadas 288 (12 x 24) situações. Uma função chamada de “Função Energia” é adotada para mensurar o quão boa é a solução.

O procedimento para resolução do problema tem os seguintes passos:

1. Inicializam-se os parâmetros de annealing com os valores de temperatura inicial, temperatura de congelamento, taxa de resfriamento e número máximo de iterações para cada temperatura. Escolhe-se então arbitrariamente uma solução candidata, que satisfaça as exigências descritas anteriormente. Para se encontrar os parâmetros das funções de pertinência do Sistema Fuzzy, é necessário realizar um Fluxo de Carga de Distribuição. Com os valores das funções de pertinência, o valor de energia pode ser encontrado somando-se os valores da função de pertinência.
2. Nesse passo cria-se uma nova solução. Como dito anteriormente, utilizando-se um método de busca, a Simulação Annealing perturba apenas uma variável de controle da solução antiga para encontrar

uma nova solução, construindo assim uma nova solução de forma mais rápida e fácil.

3. Faz-se uma checagem de todos os parâmetros para ver se nenhuma condição foi violada e calcula-se o novo valor da função energia. Se alguma condição for violada, a nova solução é descartada e retorna-se ao passo anterior para se calcular outra. Calcula-se um novo valor de energia caso a solução seja aceita.
4. Se a solução vinda do passo anterior decrementar o valor de energia, então essa solução é aceita, caso contrário o processo de análise passa por um método probabilístico de escolha randômica, para evitar que a solução fique presa no mínimo local e possa alcançar o mínimo global.
5. Se a temperatura atual da Simulação Annealing for menor que a de congelamento, então a solução final é apresentada e o processo é interrompido. Caso contrário, o número de iterações é zerado e o processo é reiniciado até se encontrar uma solução ótima.

No passo 4 pode-se observar que a estratégia de escolha da melhor solução passa por uma metodologia randômica de escolha, o que produziu excelentes resultados de convergência. A estratégia proposta apresentou bons resultados tanto para o refinamento do Sistema Fuzzy quanto para a solução do controle de tensão e potência reativa em sistemas de distribuição.

2.6 Considerações parciais

No início desse capítulo foram apresentados os aspectos regulatórios da qualidade de energia elétrica, elencando os requisitos normativos para a tensão de regime permanente.

Ao longo do capítulo foram citados os principais dispositivos convencionais para o controle de tensão na rede de distribuição: transformadores com comutação sob carga, reguladores de tensão e bancos de capacitores. Esses dispositivos são eficientes para a regulação na média tensão, porém podem não ser suficientes para o controle de tensão dos clientes conectados na rede secundária.

Foram apresentadas também as abordagens de controle consideradas inteligentes, principalmente aquelas baseadas em redes neurais artificiais e sistemas fuzzy. As principais vantagens desses sistemas inteligentes estão em suas habilidades naturais de poder mapear os relacionamentos existentes entre as entradas e saídas de processos tipicamente não lineares. Essas ferramentas são normalmente utilizadas em processos aonde o comportamento entre as variáveis de entrada e saída não é ainda bem estabelecido, tornando-se assim bem atrativas para o caso de controle do perfil de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Como resultado da investigação dessas abordagens, diversos subsídios e ideias foram produzidos visando o alcance dos objetivos propostos nesta dissertação. Como uma consequência, um esquema preliminar de um módulo inteligente para ser aplicado no presente projeto será apresentado no capítulo 4.

3 Introdução aos sistemas de inferência fuzzy

3.1 Introdução

Os sistemas fuzzy tentam aproximar a decisão computacional do raciocínio humano, que não é exato, porém é repleto de informações aproximadas e qualitativas. Esses sistemas são capazes de tratar essas informações por meio de expressões linguísticas, facilitando a modelagem de um problema.

Modelagem e controle fuzzy de sistemas são técnicas para o tratamento de informações qualitativas de uma forma rigorosa. Derivada do conceito de conjuntos fuzzy, a lógica fuzzy constitui a base para o desenvolvimento de métodos e algoritmos de modelagem e controle de processos, permitindo a redução da complexidade de projeto e implementação, tornando-se uma alternativa para a solução de problemas de controle e modelagem de sistemas.

Esta forma de estruturação do raciocínio é capaz de tomar decisões racionais mesmo estando em um ambiente de incertezas e imprecisões, onde dados desta natureza e até mesmo conflitantes são tratados (LEE, 1990). A tecnologia advinda da teoria de conjuntos fuzzy e da lógica fuzzy tem permitido a aplicação destas técnicas em diversas áreas do conhecimento (GOMIDE; GUDWIN, 1994; PAL; NATH, 2010), tendo como exemplos os sistemas fuzzy de controle, os quais podem possibilitar um controle mais acurado, além de um desempenho estável e robusto; ou ainda, na modelagem de sistemas, onde através das técnicas de sistemas de inferência fuzzy é possível uma representação mais fiel do mesmo e inclusive a extração de informações qualitativas deste.

Como mencionado anteriormente, a lógica fuzzy procura expressar o raciocínio aproximado, ou seja, através da representação do conhecimento por regras pode-se responder a um determinado estímulo. Na lógica fuzzy existe a opção adicional de se empregar probabilidades linguísticas, como por exemplo, “provável”, “altamente provável” e “improvável”, interpretados como números fuzzy e manipulados pela aritmética fuzzy. Também em contraste com a lógica modal clássica, o conceito de possibilidade é interpretado utilizando os subconjuntos fuzzy no universo dos reais.

Através da lógica fuzzy, um sistema pode ser representado através de conceitos imprecisos tais como “rápido”, “baixo” e “pequeno”. Essas propriedades são responsáveis, entre outras, pela facilidade na extração do conhecimento de um sistema a partir de observações realizadas sobre este.

Em um sistema de inferência fuzzy, os valores de entrada são normalizados e convertidos para uma representação fuzzy. Este processo é denominado de fuzzificação das variáveis de entrada. As regras do sistema fuzzy serão executadas em paralelo, conseqüentemente, uma região fuzzy será produzida para cada variável. A criação desta região fuzzy através das regras ativas do sistema é conhecida por agregação. Depois do processamento das regras de inferência, as regiões fuzzy são convertidas em valores não fuzzy, também conhecidas como valores “crisp”, determinando assim, o valor de cada variável de saída do sistema. O processo de se converter tal região fuzzy em um valor real é conhecido por defuzzificação.

3.2 Conjuntos fuzzy

Nesta seção serão apresentados os conceitos básicos relacionados aos conjuntos e a lógica fuzzy tendo como foco a modelagem de sistemas. Apesar de existir uma complexa base formal sustentando seu uso na modelagem e controle de sistemas, serão evidenciados somente os fundamentos necessários para o entendimento da teoria básica de modelagem fuzzy. Maiores detalhes podem ser conferidos em (ZADEH, 1965, 1973).

Assim, na teoria de conjuntos clássica, um elemento ou pertence a uma classe ou não. Dado um universo de discurso U e um elemento particular $x \in U$, o grau de pertinência $\mu_A(x)$ com relação a um conjunto $A \subseteq U$ é dado por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A \\ 0, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

A função $\mu_A(x): U \rightarrow \{0, 1\}$ é chamado de função característica na teoria clássica de conjuntos. Pode-se observar através da expressão (3.1) que a função característica, assim definida, pode assumir apenas valores discretos.

Frequentemente, uma generalização desta ideia é utilizada, por exemplo, para manipulação de dados com erros limitados. Todos os números pertencentes a um intervalo pré-definido terão um grau de pertinência 1, os números que não pertencerem a este intervalo possuirão um grau de pertinência nulo como pode ser observado na Figura 3.1 (a). Na Figura 3.1 (b) o caso preciso é apresentado e deste tem-se que o grau de pertinência é um somente em determinado valor, sendo nulo para os demais valores.

Figura 3.1 – Funções de pertinência.

Zadeh propôs uma caracterização mais ampla, na medida em que sugere que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros (ZADEH, 1994). O grau de pertinência pode então assumir qualquer valor entre o intervalo $[0, 1]$, sendo que o valor 0 indica uma completa exclusão e um valor 1 representa completa pertinência, ou seja, a função característica passa a ser contínua no seu domínio. Esta generalização aumenta o poder de expressão da função característica. Na Figura 3.1 (c), esta abordagem descrita é apresentada na forma de uma função de pertinência triangular com pico em x , sugerindo a ideia de que quanto mais próximo de x , mais o elemento se identifica com o conceito representado por x .

A partir desta definição, o conceito de elemento e o conceito de conjunto podem ser expandidos e novas denominações mais amplas assumidas, como apresentado a seguir.

Formalmente, seja U uma coleção de objetos denominados genericamente por $\{u\}$. O domínio U é chamado de universo de discurso, podendo ser contínuo ou

discreto. Um conjunto fuzzy A em um universo de discurso U é definido por uma função de pertinência μ_A que assume valores em um intervalo $[0, 1]$, ou seja:

$$\mu_A : U \rightarrow [0, 1] \quad (3.2)$$

O conjunto suporte de um conjunto fuzzy A é o subconjunto dos pontos u de U tal que $\mu_A(u) > 0$. Um conjunto fuzzy cujo conjunto suporte é um único ponto de U com $\mu_A=1$ é chamado de um conjunto unitário fuzzy. A partir desta definição, os conjuntos clássicos passam a ser um caso específico na teoria de conjuntos fuzzy. Na Figura 3.1 (c) tem-se uma função de pertinência do tipo triangular, no entanto, pode-se utilizar qualquer função $f: \mathfrak{R} \rightarrow [0,1]$ para a representação de um determinado conjunto fuzzy.

3.3 Operadores fuzzy

Sejam A e B dois conjuntos fuzzy definidos em um universo de discurso U com funções de pertinência μ_A e μ_B , respectivamente. As operações envolvendo conjuntos fuzzy, tais como a união ($A \cup B$), a intersecção ($A \cap B$) e o complemento ($\neg A$) são definidas respectivamente de maneira formal pelas expressões (3.3), (3.4) e (3.5).

$$\mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) \& \mu_B(u) \quad (3.3)$$

$$\mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \Gamma \mu_B(u) \quad (3.4)$$

$$\mu_{\neg A}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (3.5)$$

onde Γ é uma norma triangular (t -norma) e $\&$ é uma co-norma triangular (s -norma).

Como exemplo de s -norma tem-se a expressão (3.6) e como exemplo da t -norma tem-se a expressão (3.7).

$$\mu_{A \cup B} = \max \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \} \quad (3.6)$$

$$\mu_{A \cap B} = \min \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \} \quad (3.7)$$

O emprego do operador “max” representando a s -norma e o emprego do operador “min” representando a t -norma foi proposto inicialmente por Zadeh (ZADEH, 1965). No entanto, inúmeras outras s -norma e t -norma podem ser empregadas na definição dos sistemas fuzzy (PEDRYCZ; GOMIDE, 1998).

3.4 Regras fuzzy

Para expressar conceitos ou relacionamentos através de elementos da linguagem natural é muito comum o uso de elementos qualitativos ao invés de valores quantitativos. Elementos linguísticos típicos incluem expressões do tipo “mais ou menos”, “alto”, “não muitos”, “médios”, etc. Estas ideias são capturadas pela definição de variáveis linguísticas. Uma variável linguística tem por característica assumir valores dentro de um conjunto de termos linguísticos, ou seja, palavras ou frases. Assim, ao invés de assumir instâncias numéricas, estas variáveis assumem instâncias linguísticas.

Por exemplo, uma variável linguística “Corrente Elétrica” poderá assumir como valor um dos termos do conjunto {“baixa”, “média”, “alta”}. Para se atribuir um significado aos termos linguísticos, associa-se a cada um destes termos um conjunto fuzzy definido sobre um universo de discurso comum, que neste exemplo será a “Corrente Elétrica”. A Figura 3.2 ilustra três possíveis termos linguísticos para a variável linguística representando a corrente elétrica.

Figura 3.2 – Representação da variável linguística temperatura.

A forma mais comum de expressar o conhecimento é por meio de regras do tipo condição–ação. Neste tipo de regra, um conjunto de condições descrevendo uma parcela observável das entradas do processo é associado com uma ação de saída que irá manter ou levar o sistema às condições desejadas, ou ainda, expressar o conhecimento especialista envolvido em um sistema e permitir que a modelagem seja mais flexível e comporte informações qualitativas do processo.

Tipicamente, uma condição é uma proposição linguística (envolvendo variáveis linguísticas) sobre o valor de alguma das variáveis de entrada, como por exemplo, “o erro é grande e positivo”. Da mesma maneira, uma ação típica de controle é uma descrição linguística, como por exemplo, “aumente um pouco a vazão”. A ideia embutida junto às regras fuzzy de representar o conhecimento por meio de um conjunto de termos linguísticos associados às variáveis de saída e entrada do processo é absorvida pelos sistemas de inferência fuzzy. As ações de controle ou as saídas do modelo são expressas de forma similar para cada variável de controle (saídas). Regras do tipo se–então são frequentemente chamadas de declarações condicionais fuzzy ou simplesmente regras fuzzy. Dependendo do propósito, controle ou modelagem, podem ser:

$$\mu_{R_i} = [\mu_{A_i}(u) \text{ and } \mu_{B_i}(v)] \rightarrow \mu_{C_i}(w) \quad (3.8)$$

onde A_i , B_i e C_i são conjuntos fuzzy pertencentes respectivamente aos universos de discursos U , V e W , e o operador $(\rightarrow)$ denota uma função de implicação fuzzy.

Utilizando a regra de inferência composicional de Zadeh (ZADEH, 1973) para uma relação do tipo $R_{A \rightarrow B}$, onde $A \in U$ e $B \in V$, e dado um conjunto fuzzy de U denotado por A' e um conjunto fuzzy B' de V , a inferência de A' é dada pela seguinte função de pertinência:

$$\mu_{B'}(v) = \max_u \{ \min(\mu_{A'}(u), \mu_R(u, v)) \}; u \in U, v \in V \quad (3.9)$$

A ação de controle ou de estimação consistirá da união de todas as funções fuzzy ativadas. O valor final, ou seja, aquele que será apresentado pelas saídas do sistema fuzzy, será determinado pelo processo de defuzzificação. Uma descrição detalhada dos processos envolvidos com a inferência fuzzy pode ser encontrada em (IPEDRYCZ; GOMIDE, 1998).

3.5 Sistemas de inferência fuzzy

Uma regra fuzzy típica pode ser dada por:

$$\mu_{R_i} = \mu_{(A_i \text{ and } B_i \rightarrow C_i)}(u, v, w)$$

Uma regra é acionada e as contribuições das diversas regras após a inferência são combinadas pelo operador de agregação. Por exemplo, supondo-se que $B'_1, \dots, B'_n$ são todos os resultados derivados das diversas regras acionadas, todos relacionados a uma mesma variável linguística, o resultado da implicação de todas as regras B' será:

$$B' = \bigcup_i^n B'_i \quad (3.10)$$

onde o símbolo $\cup$ representa o operador agregação. Um exemplo de função para o operador agregação é o operador união.

A Figura 3.3 ilustra o processo de inferência max–min quando existem duas regras, $A_i \rightarrow B_i$ e $A_j \rightarrow B_j$, onde A' é o fato de entrada, representado como um conjunto *fuzzy*.

Figura 3.3 – Mecanismo de inferência *fuzzy*.

Todo processo envolvido em um sistema *fuzzy* é mostrado resumidamente pela Figura 3.4.

Figura 3.4 – Diagrama típico de um modelo de Sistemas *Fuzzy*.

Os valores numéricos provenientes da medição passam pelo processo de *fuzzy*ificação, sendo então representados por valores linguísticos.

A base de conhecimento do Sistema *Fuzzy* encontra-se armazenado nas Regras *Fuzzy* do tipo “Se-Então”. O processo de inferência aplicado aos valores linguísticos então resulta em uma região de saída, também em valores linguísticos. Para que estes possam realmente ser utilizados é necessário o processo de defuzzificação, encontra um valor numérico para a região de saída *Fuzzy*, representada em termos linguísticos.

3.6 Considerações parciais

Ao longo desse capítulo, foram apresentadas as definições e conceitos do Sistema de Inferência Fuzzy. A lógica fuzzy é um ramo da matemática que considera raciocínio aproximado ao invés do exato.

Pode ser utilizada como base para o desenvolvimento de métodos e algoritmos de modelagem, reduzindo a complexidade da implementação, uma vez que a base de conhecimento é feita através de dados qualitativos, onde o conhecimento de um especialista é traduzido por meio de regras e expressões linguísticas.

4 Proposta baseada em comutação no lado de baixa tensão de transformadores de distribuição para regulação de tensão

4.1 Introdução

De acordo com os estudos realizados, os principais métodos convencionais ou inteligentes para o controle da tensão, são específicos para a regulação da tensão na média tensão e não focam no controle da tensão na rede secundária. Tendo como base a necessidade do setor elétrico por um sistema de regulação no lado de baixa tensão, a proposta desse mestrado é desenvolver um transformador de distribuição com comutação de derivações na baixa tensão de forma a realizar o controle da tensão em ponto mais próximo ao ponto de acoplamento dos clientes. Essa solução auxiliará na correção da tensão de fornecimento, deixando-a dentro da faixa adequada. Com isso, evitam-se compensações financeiras para as concessionárias e melhora a satisfação dos clientes.

Para o transformador de distribuição, a proposta é especificar o número de derivações e o espaçamento dos degraus no lado secundário, de forma que seja eficiente na regulação de tensão em qualquer ponto de instalação na rede de distribuição.

Para o controle de tensão, a proposta é a utilização de sistemas inteligentes visando fornecer soluções eficientes para o controle de tensão nos transformadores

dos sistemas de distribuição de energia elétrica, garantindo que a tensão de fornecimento seja entregue aos consumidores em conformidade.

Desta forma, tendo como objetivo considerar as diversas variáveis e grandezas que estão envolvidas com os processos que visam o controle do perfil de tensão ao longo dos alimentadores derivados das subestações de distribuição, torna-se então relevante à proposição de um sistema inteligente que possa ser eficientemente implementado neste tipo de aplicação. Um dos aspectos diferenciais do sistema proposto está pautado na arquitetura de um módulo inteligente que leve em consideração as informações disponíveis no lado de baixa tensão do transformador de distribuição.

Um sistema baseado em sistemas inteligentes é capaz de emitir uma decisão apoiada em conhecimentos justificados, a partir de uma base de informações de entradas, tal qual um especialista de determinada área do conhecimento.

A Figura 4.1 ilustra o diagrama esquemático preliminar representando a solução inteligente para o controle da tensão de fornecimento, mais próximo aos clientes residenciais, a ser desenvolvido. O propósito é que essa solução faça o monitoramento das grandezas de tensão e corrente e tome a decisão para a comutação do tap ideal que resulte numa tensão adequada para os clientes conectados nesse transformador. Mesmo nos alimentadores que já possuem outros dispositivos de controle de tensão ao longo da rede de distribuição, eles podem não ser capazes de regular a tensão nos clientes ligados na rede secundária. Com essa solução, haverá uma complementação na regulação da tensão na rede secundária. Essa solução pode ser resumida em 3 módulos e que serão detalhados ao longo desse capítulo:

1. Transformador de Distribuição com derivações no lado secundário
2. Módulo de Eletrônica de Potência
3. Placa de controle inteligente de tensão

Figura 4.1 – Diagrama esquemático preliminar da solução proposta

4.2 Transformador de distribuição com derivações no lado secundário

O transformador representa a parte ativa dessa solução. Para a definição das derivações foi necessário realizar uma análise estatística através dos dados de uma campanha de medição nos clientes de baixa tensão, observando os aspectos regulatórios dos níveis de tensão. Também, preocupou-se em atender aos requisitos técnicos dos transformadores de distribuição, para isso, realizaram-se todos os ensaios técnicos.

4.2.1 Análise estatística para a determinação dos requisitos de regulação de tensão

Para a especificação do transformador de distribuição com derivações no lado secundário, foi necessário elaborar um diagnóstico a respeito da tensão de fornecimento. Para isso, realizou-se uma campanha de medição em uma distribuidora de energia elétrica e foram analisados 8334 registros de medições em clientes de baixa tensão, de 2007 a 2012.

A Figura 4.2 apresenta um diagrama esquemático simplificado de como estão representados os clientes de baixa tensão, bem como a origem das medições. Foram realizadas medições de tensão nos clientes de baixa tensão (BT) e no secundário do transformador de distribuição.

Figura 4.2 – Diagrama esquemático representando a origem das medições

Dos registros obtidos, foram avaliados os valores de máximos e de mínimos, permitindo uma análise estatística, tal como apresentado pela Figura 4.3.

Figura 4.3 - Função densidade de probabilidade acumulada.

Na Figura 4.3 mostra a função densidade de probabilidade para os valores mínimos e máximos de tensão. É possível observar que, para os valores mínimos, em 40% das medições, a tensão mínima ficou abaixo de 116 V, e para os valores máximos, em 20% das medições a tensão máxima ficou acima de 133 V, ou seja, fora dos valores adequados, conforme o Módulo 8.

Também pela Figura 4.3, verifica-se que a alternativa de regulação de tensão na baixa tensão possui abrangência de aplicação não apenas na área de concessão da distribuidora analisada, mas também em todo o setor de distribuição. Além disso, não apenas o problema de subtensão deve ser atacado, mas também se tem a possibilidade de se abordar os problemas de sobretensão.

Figura 4.4 – Avaliação do resumo das campanhas de medição.

Outra análise, disponível na Figura 4.4, mostrou que 0,4% dos consumidores estão em permanente subtensão, ao passo que 0,3% dos consumidores estão em permanente sobretensão. Mesmo que a porcentagem de clientes atingidos seja baixa, há problema de conformidade da tensão, o que resulta em compensações financeiras para concessionária e insatisfação dos clientes.

Também foram realizadas medições no lado secundário de alguns transformadores de distribuição com compensação de reativos na baixa tensão, com a seguinte característica:

- 75 kVA + 15 kVAr
- 45 kVA + 7.5 kVAr
- 45 kVA + 0 kVAr

Figura 4.5 – Tensão no PAC em função da tensão secundária

A Figura 4.5 relaciona a tensão no PAC, ponto de acoplamento comum, que é a tensão medida nos clientes BT com a medição obtida no secundário do transformador de distribuição, separado em tensão máxima, média e mínima. Da Figura 4.5, é possível verificar que para cada variação de 1% na tensão secundária dos transformadores de distribuição pode-se ter um acréscimo de:

- 7% da tensão mínima;
- 4% da tensão média;
- 3% da tensão máxima;

Tendo como base essas análises estatísticas, definiu-se o número e o degrau de tensão de cada derivação. As derivações de tensão foram especificadas em número de 5 com tensões nominais iguais as apresentadas por meio da Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características das derivações dos transformadores

Tensão Nominal (V)	Designação dos terminais	Nomenclatura da derivação
242,0/139,7	X1A, X2A e X3A	TAP A
238,0/137,1	X1B, X2B e X3B	TAP B
229,0/132,0	X1C, X2C e X3C	TAP C
220,0/126,8	X1D, X2D e X3D	TAP D
211,0/121,6	X1E, X2E e X3E	TAP E

A tensão nominal é a denominada por TAP D. Foram definidas 3 derivações para atender condições de subtensão, TAP A, TAP B e TAP C, e uma derivação para atender condições de sobretensão, TAP E. Nas derivações entre o TAP B e o TAP E, inclusive, o degrau de tensão adotado fora de 4% da tensão nominal. Na derivação TAP A o degrau foi de 2%, aproximadamente.

Os TAPs primários foram mantidos em 13,8 kV, 13,2 kV e 12,6 kV.

Com a especificação das derivações do transformador foram proposto 3 protótipos de transformadores com comutação de TAPs no secundário:

- 2 transformadores de 75 kVA sendo um com núcleo de aço silício e outro com núcleo amorfo;
- 1 transformador de 45 kVA com núcleo de aço silício.

4.2.2 Constituição e características de transformadores com derivações no enrolamento de baixa tensão

Os transformadores empregados nessa pesquisa foram especificados de forma a atender diversas restrições térmicas e elétricas. Cabe salientar que as características específicas dos transformadores, necessários ao desenvolvimento

integral da pesquisa resultaram na construção de modelos novos destes dispositivos, sendo este também um dos diferenciais do trabalho. Dentre as restrições térmicas pode-se destacar:

- Temperatura ambiente em torno de 40°C;
- Temperatura média anual em torno de 30°C;
- Temperatura do ponto mais quente deve estar em torno de 65°C;
- Temperatura de topo de óleo deve estar em torno de 50°C;
- Temperatura nos enrolamentos deve estar em torno de 55°C;

Além de atender a estas restrições térmicas, o transformador deve ser resfriado por convecção natural (ONAN).

Já com relação às restrições elétricas, todos os transformadores devem ser trifásicos com frequência nominal de 60 Hz e ligação em Δ -Y, onde no lado de alta deve haver três taps (13,8 kV, 13,2 kV e 12,6 kV). É importante comentar que o comutador deveria ser projetado para ser acessado de forma externa, pelo tanque conforme pode ser visualizado por meio da Figura 4.6.

Figura 4.6 – Comutador do lado de alta.

A ITB Transformadores confeccionou os transformadores especificados com terminais de alta designados como: H1, H2 e H3; e os terminais de baixa são designados como: X1A, X2A e X3A (242/139,7 V - Tap A), X1B, X2B e X3B (238/137,1 V - Tap B), X1C, X2C e X3C (229/132,0 V - Tap C), X1D, X2D e X3D (220/126,8 V - Tap D), X1E, X2E e X3E (211/121,6 V - Tap E) e X0 (Neutro), conforme Figura 4.7.

Figura 4.7 – Transformador de 45 kVA.

Para o transformador de 45 kVA com núcleo de aço silício, a característica em termos de suas correntes pode ser visualizada por meio da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Correntes características do transformador de 45 kVA.

	Primário	Tap A	Tap B	Tap C	Tap D	Tap E
Correntes (A)	1,88	107,36	109,16	113,45	118,09	123,13

Os resultados dos ensaios de resistência ôhmica dos enrolamentos podem ser verificados por meio da Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Ensaio de resistência ôhmica dos enrolamentos para o transformador de 45 kVA.

Enrolamentos	Tap A	Tap B	Tap C	Tap D	Tap D
H1 / H2	69,58 Ω	69,51 Ω	69,55 Ω	69,61 Ω	69,59 Ω
H1 / H3	69,04 Ω	69,13 Ω	69,13 Ω	69,13 Ω	69,10 Ω
H2 / H3	69,43 Ω	69,38 Ω	69,42 Ω	69,46 Ω	69,41 Ω
X1 / X2	15,25 m Ω	13,67 m Ω	19,64 m Ω	15,94 m Ω	13,63 m Ω
X1 / X3	15,26 m Ω	15,43 m Ω	24,20 m Ω	16,33 m Ω	13,43 m Ω
X2 / X3	15,17 m Ω	12,91 m Ω	21,20 m Ω	14,44 m Ω	13,63 m Ω

Os resultados dos ensaios de relação de transformação podem ser visualizados por meio da Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6.

Tabela 4.4 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 45 kVA (Taps A e B).

Tensão no Primário (kV)	Tap A				Tap B			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)
13,8	98,73	98,78	98,73	-0,04	100,57	100,64	100,60	0,21
13,2	94,43	94,47	94,43	-0,05	96,18	96,25	96,23	0,19
12,6	90,12	90,16	90,14	-0,07	91,80	91,86	91,85	0,18

Tabela 4.5 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 45 kVA (Taps C e D).

Tensão no Primário (kV)	Tap C				Tap D			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)
13,8	104,50	104,58	104,51	0,19	108,69	108,85	108,79	0,19
13,2	99,96	100,02	99,96	0,18	103,96	104,10	104,07	0,17
12,6	95,40	95,46	95,40	0,17	99,22	99,35	99,33	0,15

Tabela 4.6 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 45 kVA (Tap E).

Tensão no Primário (kV)	Tap E			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)
13,8	113,42	113,48	113,41	0,18
13,2	108,48	108,53	108,47	0,16
12,6	103,53	103,57	103,53	0,13

Além dos ensaios supracitados, também foram realizados ensaios a vazio e de curto circuito, os quais podem ser respectivamente observados por meio da Tabela 4.7 e Tabela 4.8.

Tabela 4.7 – Ensaio a vazio para o transformador de 45 kVA.

	Tap A	Tap B	Tap C	Tap D	Tap E
Tensão do Ensaio (V)	242	238	229	220	211
Corrente de Excitação (A)	0,70	0,74	0,77	0,82	0,88
Corrente de Excitação (%)	0,65	0,68	0,68	0,70	0,71
Perdas a Vazio (W)	156	157	158	157	158

Tabela 4.8 – Ensaio de curto circuito para o transformador de 45 kVA.

	Tap A	Tap B	Tap C	Tap D	Tap E
Corrente de Curto Circuito (A)	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88
Tensão de Curto Circuito (V)	558,15	589,60	648,60	706,28	775,45
Potência de Curto Circuito (W)	704	770	827	806	810
Temperatura Ambiente (°C)	29	29	29	29	29

É importante comentar que para o ensaio de resistência de isolamento, a tensão do megômetro era de 2500 V, onde puderam ser medidas as seguintes resistências:

- AT/BT: 35000 MΩ;
- AT/Massa: 25000 MΩ;
- BT/Massa: 20000 MΩ.

Por fim, tanto para o ensaio de tensão aplicada como para o ensaio de tensão induzida, ambos foram realizados durante um período de 60 segundos, sendo o ensaio de tensão aplicada feito com 60 Hz (frequência nominal) e o ensaio de tensão induzida com o dobro da frequência nominal, isto é, 120 Hz. Assim, durante o ensaio de tensão aplicada, aplicou-se 34 kV AT/BT à massa e 10 kV BT/AT à massa.

A seguir, são apresentados os ensaios realizados no transformador de 75 kVA com núcleo de aço silício, representados pela Figura 4.8.

Figura 4.8 – Transformador de 75 kVA.

As correntes características do transformador de 75 kVA com núcleo de aço silício podem ser observadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Correntes características do transformador de 75 kVA (núcleo de aço silício).

	Primário	Tap A	Tap B	Tap C	Tap D	Tap E
Correntes (A)	3,14	178,93	181,94	189,09	196,82	205,22

Os resultados dos ensaios de resistência ôhmica dos enrolamentos podem ser verificados por meio da Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Ensaio de resistência ôhmica dos enrolamentos para o transformador de 75 kVA (com núcleo de aço silício).

Enrolamentos	Tap A	Tap B	Tap C	Tap D	Tap E
H1 / H2	34,72 Ω	34,72 Ω	34,72 Ω	34,72 Ω	34,71 Ω
H1 / H3	34,37 Ω	34,37 Ω	34,37 Ω	34,36 Ω	34,38 Ω
H2 / H3	34,84 Ω	34,84 Ω	34,83 Ω	34,83 Ω	34,84 Ω
X1 / X2	6,96 m Ω	6,99 m Ω	6,83 m Ω	6,65 m Ω	6,54 m Ω
X1 / X3	6,91 m Ω	7,01 m Ω	6,74 m Ω	6,67 m Ω	6,50 m Ω
X2 / X3	6,89 m Ω	6,89 m Ω	6,76 m Ω	6,61 m Ω	6,49 m Ω

Os ensaios de relação de transformação podem ser visualizados por meio da Tabela 4.11, Tabela 4.12 e Tabela 4.13.

Tabela 4.11 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 75 kVA - núcleo de aço silício (Taps A e B).

Tensão no Primário (kV)	Tap A				Tap B			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)
13,8	98,72	98,75	98,70	-0,07	100,58	100,63	100,48	0,20
13,2	94,42	94,46	94,40	-0,08	96,18	96,24	96,10	0,18
12,6	90,12	90,15	90,10	-0,09	91,80	91,85	91,72	0,17

Tabela 4.12 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 75 kVA - núcleo de aço silício (Taps C e D).

Tensão no Primário (kV)	Tap C				Tap D			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)
13,8	104,41	104,56	104,49	0,18	108,78	108,83	108,76	0,17
13,2	99,85	99,99	99,93	0,15	104,03	104,08	104,01	0,15
12,6	95,30	95,44	95,38	0,15	99,28	99,33	99,27	0,13

Tabela 4.13 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 75 kVA - núcleo de aço silício (Tap E).

Tensão no Primário (kV)	Tap E			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)
13,8	113,42	113,50	113,27	0,19
13,2	108,45	108,53	108,32	0,16
12,6	103,50	103,57	103,38	0,13

Além dos ensaios acima mostrados, também foram realizados ensaios a vazio e de curto circuito, os quais podem ser respectivamente observados por meio da Tabela 4.14 e Tabela 4.15.

Tabela 4.14 – Ensaio a vazio para o transformador de 75 kVA (núcleo de aço silício).

	Tap A	Tap B	Tap C	Tap D	Tap E
Tensão do Ensaio (V)	242	238	229	220	211
Corrente de Excitação (A)	1,18	1,21	1,31	1,45	1,53
Corrente de Excitação (%)	0,66	0,67	0,69	0,73	0,75
Perdas a Vazio (W)	233	238	237	240	241

Tabela 4.15 – Ensaio de curto circuito para o transformador de 75 kVA (núcleo de aço silício).

	Tap A	Tap B	Tap C	Tap D	Tap E
Corrente de Curto Circuito (A)	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14
Tensão de Curto Circuito (V)	631,28	691,01	845,54	1022,56	1195,96
Potência de Curto Circuito (W)	1057	1118	1270	1458	1642
Temperatura Ambiente (°C)	29	29	29	29	29

Ressalta-se que para o ensaio de resistência de isolamento, a tensão do megômetro era de 2500 V, onde puderam ser medidas as seguintes resistências:

- AT/BT: 35000 MΩ;
- AT/Massa: 25000 MΩ;
- BT/Massa: 20000 MΩ.

Os ensaios de tensão induzida e tensão aplicada foram realizados em conformidade com aqueles previamente apresentados para o transformador de 45 kVA com núcleo de aço silício.

A seguir, são apresentados os ensaios realizados no transformador de 75 kVA com núcleo amorfo, representado pela Figura 4.9.

Figura 4.9 – Transformador de 75 kVA com núcleo amorfo.

O transformador de 75 kVA com núcleo amorfo apresenta correntes características iguais a aquelas apresentadas na Tabela 4.9 para o transformador de 75 kVA com núcleo de aço silício. Os ensaios de resistência ôhmica dos enrolamentos podem ser verificados por meio da Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Ensaio de resistência ôhmica dos enrolamentos para o transformador de 75 kVA (com núcleo amorfo).

Enrolamentos	Tap A	Tap B	Tap C	Tap D	Tap E
H1 / H2	36,05 Ω	36,06 Ω	36,04 Ω	36,05 Ω	36,06 Ω
H1 / H3	35,94 Ω	35,95 Ω	35,97 Ω	35,93 Ω	35,91 Ω
H2 / H3	35,79 Ω	35,77 Ω	35,77 Ω	35,79 Ω	35,78 Ω
X1 / X2	9,40 m Ω	9,82 m Ω	9,52 m Ω	8,51 m Ω	8,32 m Ω
X1 / X3	9,47 m Ω	9,67 m Ω	9,62 m Ω	8,93 m Ω	8,75 m Ω
X2 / X3	9,25 m Ω	9,74 m Ω	9,44 m Ω	8,57 m Ω	8,36 m Ω

Os ensaios de relação de transformação podem ser visualizados por meio da Tabela 4.17, Tabela 4.18 e Tabela 4.19.

Tabela 4.17 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 75 kVA - núcleo amorfo (Taps A e B).

Tensão no Primário (kV)	Tap A				Tap B			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)
13,8	98,73	98,80	98,68	-0,09	100,55	100,65	100,57	0,22
13,2	94,42	94,48	94,39	-0,09	96,17	96,25	96,19	0,19
12,6	90,13	90,18	90,09	-0,10	91,79	91,86	91,81	0,18

Tabela 4.18 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 75 kVA - núcleo amorfo (Taps C e D).

Tensão no Primário (kV)	Tap C				Tap D			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)
13,8	104,52	104,62	104,48	0,23	108,76	108,90	108,79	0,23
13,2	99,96	100,05	99,92	0,21	104,01	104,13	104,04	0,20
12,6	95,40	95,47	95,37	0,18	99,27	99,36	99,30	0,16

Tabela 4.19 – Ensaio de relação de transformação para o transformador de 75 kVA - núcleo amorfo
(Tap E).

Tensão no Primário (kV)	Tap E			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Erro(%)
13,8	113,45	113,58	113,40	0,26
13,2	108,48	108,60	108,43	0,23
12,6	103,53	103,63	103,47	0,19

Além dos ensaios acima mostrados, também foram realizados ensaios a vazio e de curto circuito, os quais podem ser respectivamente observados por meio da Tabela 4.20 e Tabela 4.21.

Tabela 4.20 – Ensaio a vazio para o transformador de 75 kVA (núcleo amorfo).

	Tap A	Tap B	Tap C	Tap D	Tap E
Tensão do Ensaio (V)	242	238	229	220	211
Corrente de Excitação (A)	1,41	1,48	1,66	1,81	1,98
Corrente de Excitação (%)	0,79	0,81	0,88	0,92	0,97
Perdas a Vazio (W)	79	75	81	82	83

Tabela 4.21 – Ensaio de curto circuito para o transformador de 75 kVA (núcleo amorfo).

	Tap A	Tap B	Tap C	Tap D	Tap E
Corrente de Curto Circuito (A)	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14
Tensão de Curto Circuito (V)	670,24	732,44	902,03	1096,31	1293,04
Potência de Curto Circuito (W)	1227	1283	1432	1581	1783
Temperatura Ambiente (°C)	31	31	31	32	32

Destaca-se que para o ensaio de resistência de isolamento, a tensão do megômetro era de 2500 V, onde puderam ser medidas as seguintes resistências:

- AT/BT: 22000 M Ω ;
- AT/Massa: 23000 M Ω ;
- BT/Massa: 10000 M Ω .

Os ensaios de tensão induzida e tensão aplicada foram realizados em conformidade com aqueles previamente apresentados para os transformadores de 45 kVA e 75 kVA com núcleo de aço silício.

4.3 Aspectos referentes à eletrônica de potência dedicada à comutação em transformadores de distribuição

Para o módulo da eletrônica de potência, adotou-se a tecnologia de comutação por estado sólido, utilizando tiristores, por estes apresentarem diversas características atrativas frente ao processo de comutação sob carga. Destaca-se especialmente o fato de não ser necessária a utilização de dispositivos eletromecânicos. A representação da inserção deste tipo de tecnologia para regulação na baixa tensão pode ser contemplado na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Representação da comutação sob carga eletrônica com tiristores.

Na Figura 4.11 tem-se a visualização do módulo completo da eletrônica de potência, com todos os canais e dissipadores de calor.

Figura 4.11 – Módulo completo da eletrônica de potência.

Na montagem, os módulos de tiristores foram acomodados no painel e será conectado para o comando nos taps do transformador, conforme Figura 4.12.

Figura 4.12 – Módulos de eletrônica de potência acomodados em painel.

4.4 Aspectos referentes ao controle inteligente de tensão

O módulo Controle Inteligente de Tensão é dividido em 3 sub-módulos:

1. Condicionamento de sinais de tensão e corrente;
2. Processamento e controle inteligente da tensão;
3. Acionamento da eletrônica de potência.

4.4.1 Condicionamento de sinais de tensão e corrente

Os sinais de calibração foram obtidos por meio de uma caixa de teste - Double comandada por computador, conforme pode ser visualizado na Figura 4.13. Ainda como parte de ajustes iniciais e testes do controlador inteligente, é possível se verificar a maneira que tais inspeções foram realizadas.

Figura 4.13 – Controlador inteligente sendo calibrado com sinais vindos da caixa de corrente.

A tensão aplicada a cada um dos canais analógicos de tensão variaram desde zero até 150V rms. Essa variação se deu em degraus de 5V e a cada variação media-se a tensão nos terminais de entrada da placa de controle, bem como, se registrava o resultado da conversão analógica para digital e para valor eficaz.

Os resultados fornecidos pelo sistema de controle inteligente eram enviados ao computador supervisor por meio da saída USB da placa de controle inteligente.

Nestes processos buscou-se verificar se os mecanismos de conversão estavam funcionando corretamente. É de fundamental importância para o funcionamento de todo o sistema de controle que a definição das constantes operativas permita uma conversão adequada dos valores de entrada dos sinais para valores de engenharia.

O ajuste do *software* de controle pode ser visualizado por meio da Figura 4.14, onde é possível acompanhar o desempenho do processo de conversão das variáveis de tensão, para valores de engenharia. Na figura, a tensão de entrada fora excursionada entre 0V e 150V, para as três fases.

Figura 4.14 - Detalhe do processo de conversão de sinal para valores de engenharia

Visando auxiliar nos testes de validação desenvolveu-se um *software* de forma a permitir a aquisição de dados enviados pela placa *Stellaris*, denominado Interface RTBT. Na Figura 4.15, tem-se o diagrama esquemático do funcionamento desta ferramenta.

Figura 4.15 – Ferramenta de aquisição de dados RTBT.

Nesse *software*, a primeira etapa foi desenvolver o protocolo de comunicação, de forma a transmitir os dados provindos da unidade de condicionamento de sinais da Interface RTBT para um sistema computacional. Neste protocolo são enviados os dados de leitura do sistema trifásico e o TAP corrente em que se encontra o transformador.

O canal de comunicação utilizado entre o computador e a Interface RTBT foi o (RS232) com BAUD RATE = 115200. Esta configuração permite um maior tráfego de dados entre DTE (*data terminal equipment*) e DCE (*data circuit-terminating equipment*).

4.4.2 Controle inteligente de tensão - desenvolvimento do sistema de controle fuzzy para regulação de tensão

O sub-módulo controle inteligente de tensão é responsável pelo sistema de tomada de decisão, ou seja, realizar o controle de tensão no lado de baixa tensão dos transformadores de distribuição. Para isso, esse sistema irá decidir qual é a melhor derivação para a operação do transformador naquele momento. Foi desenvolvido um sistema de controle fuzzy para a regulação da tensão.

Para se realizar o controle de tensão no lado de baixa tensão dos transformadores de distribuição, considerou-se o modelo elétrico equivalente do transformador, representado esquematicamente por meio da Figura 4.17.

Figura 4.17 – Modelo equivalente do transformador

Verifica-se que os transformadores são modelados por meio da resistência e da reatância equivalente em cada derivação, cujos dados encontram-se na Tabela 4.22 e Tabela 4.23.

Tabela 4.22 – Parâmetros do modelo elétrico equivalente

Derivação	Transformador		
	45 kVA	75 kVA	75 kVA amorfo
TAP A	$16,9 + j40,2 \, \Omega$	$9,1 + j28,1 \, \Omega$	$10,5 + j29,5 \, \Omega$
TAP B	$18,5 + j42,2 \, \Omega$	$9,6 + j30,8 \, \Omega$	$11,0 + j32,4 \, \Omega$
TAP C	$19,8 + j46,6 \, \Omega$	$10,9 + j38,0 \, \Omega$	$12,3 + j40,3 \, \Omega$
TAP D	$19,3 + j51,6 \, \Omega$	$12,5 + j46,1 \, \Omega$	$13,6 + j49,4 \, \Omega$
TAP E	$19,4 + j57,1 \, \Omega$	$14,1 + j54,1 \, \Omega$	$15,3 + j58,4 \, \Omega$

Tabela 4.23 – Resultados dos ensaios a vazio e em curto circuito

Características	Transformador		
	45 kVA	75 kVA	75 kV amorfo
Perdas a vazio	195 W	295 W	75 W
Perdas: curto-circ.	750 W	1100 W	1320 W
Corr. magnetização	3,20%	2,70%	2,7 W
Impedância	3,50%	3,50%	3,50%

Tendo como base o modelo elétrico do transformador, o sistema de tomada de decisão inteligente do controle de tensão é responsável por decidir qual é a melhor derivação para a operação. Essa decisão é baseada na estimativa de tensão em cada derivação. Para isso, consideram-se as grandezas elétricas mensuradas e

calculadas (corrente, tensão e componentes de potências) e as impedâncias do transformador.

Com essas informações, a sequência de operações ilustrada na Figura 4.18 é adotada para a tomada de decisão sobre qual a melhor derivação.

Figura 4.18 – Sequência de operação do sistema tomada de decisão

Para a comutação para o melhor TAP, é verificada a tensão com menor desvio da tensão nominal, dentro de um intervalo de tempo.

4.4.3 Acionamento da eletrônica de potência

O acompanhamento das comutações fora uma etapa importante durante a fase de validação da proposta. Tais procedimentos podem ser visualizados por meio da Figura 4.19, onde podem se visualizar os degraus das comutações do tap.

Figura 4.19 – Acompanhamento das comutações de tap produzidas pelo sistema inteligente.

Por meio da Figura 4.20 é possível visualizar a forma de onda da tensão no momento da comutação de tap. Como a comutação é realizada por meio de estado sólido, é possível constatar a necessidade de a onda passar por zero antes do chaveamento. Apesar da duração desse desligamento ser de apenas meio ciclo, é um ponto de atenção, principalmente sob o ponto de vista dos clientes conectados nesse transformador.

Figura 4.20 – Chaveamento da eletrônica de potência.

4.5 Resultados experimentais da solução desenvolvida

Antes de proceder com os ensaios sob carga, a placa de controle inteligente fora submetida a um último teste, sem as conexões envolvendo a eletrônica de potência, utilizando-se os sinalizadores luminosos. Utilizou-se um gerador de sinais para calibração, para se verificar as consistências nas lógicas de decisão dos taps comandados pelas ferramentas atualizadas no *firmware* do controlador. Tais procedimentos podem ser visualizados na Figura 4.21 e Figura 4.22.

Feitos os testes de calibração, procedeu-se então com as conexões ao módulo de eletrônica de potência. A disposição final da placa de controle bem como detalhes das conexões encontra-se registrados na Figura 4.23.

Figura 4.21 – Pré-teste realizado no controle de tensão.

Figura 4.22 – Detalhe para o gerador de sinais utilizado para calibração.

Figura 4.23 – Disposição final do módulo de controle.

Uma vez integrados os sistemas de controle e a eletrônica de potência procedeu-se com os ensaios de carga. A estrutura de acompanhamento de ensaio sob carga é formada pelo sistema supervisor, voltímetro e alicate de corrente, conforme registrado na Figura 4.24.

Figura 4.24 – Estrutura de acompanhamento de ensaios.

Na Figura 4.25 tem-se a visualização dos instrumentos para acompanhamento de tensão e corrente de ensaios, conectados ao painel de eletrônica de potência.

Figura 4.25 - Instrumentos para acompanhamento dos ensaios.

A carga máxima disponível fora conectada, conforme pode ser acompanhado pela Figura 4.26.

Figura 4.26 – Módulos de carga para ensaios de eletrônica de potência.

Os ensaios em laboratório foram plenamente satisfatórios ou seja, a solução realizou as comutações dos taps conforme a variação da tensão, realizando o controle da tensão no lado secundário do transformador.

Após os inúmeros testes laboratoriais, a solução de controle de tensão (transformador e sistema inteligente) foi montado e instalado numa rede utilizada para treinamento, cuja carga não é sazonal como de um cliente residencial. Essa instalação pode ser acompanhado na sequência fotográfica a partir da Figura 4.27.

Na Figura 4.28 é possível visualizar, instalado junto ao transformador piloto, um sistema de monitoramento de variáveis elétricas muito utilizado em qualidade de energia elétrica. Esse monitoramento permitiu acompanhar as medições das tensões e confirmar que a comutação dos taps foram realizadas com sucesso e o controle inteligente operou corretamente, corrigindo a tensão conforme a necessidade.

Figura 4.27 – Visualização da eletrônica de potência pronta para ser instalada em campo.

Figura 4.28 – Transformador piloto já instalado.

As medições de tensão registradas pelo equipamento de monitoramento, durante o período de 12 dias, mostraram que a tensão média das três fases foi de 129,7 V. A boa regulação também é confirmada pela tensão mínima em 128,1 V e a máxima em 131,9 V, como pode-se verificar na Figura 4.29. Nessa figura, o gráfico mostra a tensão medida em cada uma das fases, integralizada a cada 10 minutos.

Figura 4.29 - Resultado do monitoramento da tensão

A partir desses dados também foi possível realizar algumas simulações que permitiram as seguintes constatações:

1. Supondo o transformador operando a plena carga, porém sem sobrecarga, a tensão variaria entre 127,1 V e 131,4 V. Nessa condição, não haveria nenhuma comutação de TAP e continuamente o transformador operaria no TAP de tensão nominal igual a 229/132 V.

2. Supondo uma sobrecarga de 60%, a tensão ficaria regulada entre 127,8 V e 129,1 V. Para manter essa regulação, o transformador operaria com os TAP's de tensão nominal igual 229/132 V e 238/137,1 V. Assim, para essa condição de sobrecarga haveria a comutação de TAP.
3. Na condição de operação a vazio, os TAP que manteriam a regulação de tensão seriam os de tensão nominal igual a 127 V e 220 V.

Com isso, é possível constatar que mesmo em condições onde a tensão seja muito bem regulada e dentro do estabelecido como adequado, a adoção de uma tecnologia com regulação de tensão na baixa tensão, como a desenvolvida nesse projeto, permite, sob condições de sobrecarga, ainda assim manter a tensão adequada. Caso não houvesse esse recurso, a tensão poderia variar entre 117,7 V e 132 V, o que representa uma regulação de 11,3%. Com o recurso da regulação de tensão na baixa tensão, a tensão variaria entre 126,6 V e 127,8 V o que representa uma regulação melhor do que 1%. Além do aspecto referente à regulação, destaca-se que a não adoção de tecnologias de regulação de tensão na baixa tensão pode resultar, sob condições de sobrecarga, em transgressões dos limites de tensão.

Essas conclusões se baseiam em simulações onde a impedância do sistema de média tensão fora desconsiderado. Essa desconsideração fornece uma estimativa otimista e melhor do que a encontrada em campo. A adoção de um modelo mais realístico faria com que o desempenho da abordagem sem controle fosse ainda mais distante do que se almeja. Por fim, tem-se uma solução onde é possível verificar que a regulação de tensão na baixa tensão traz benefícios não apenas a setores com transgressões constatadas na tensão como também a setores onde a sobrecarga no transformador ocorre.

4.6 Considerações parciais

Ao longo desse capítulo, foram mostradas todas as etapas que resultaram em uma solução, o transformador de distribuição com comutação automática, para corrigir a tensão de fornecimento no ponto de acoplamento do cliente, preenchendo uma lacuna no setor de distribuição.

A partir de uma campanha de medição, realizou-se uma análise estatística das tensões de fornecimento e com isso, foi possível especificar o transformador de distribuição com derivações no lado de baixa tensão. Nessa etapa, foi definido o número e o degrau de tensão de cada derivação: três para corrigir a subtensão e 1 para corrigir a sobretensão, além do tap da tensão nominal. Foram especificados 2 transformadores de 75 kVA (núcleo de aço silício e amorfo) e 1 transformador de 45 kVA (núcleo de aço silício).

Para a comutação dos taps, adotou-se a eletrônica de potência com a tecnologia de comutação por estado sólido, utilizando tiristores devido as característica para comutação sob carga.

Para o controle de tensão, utilizou-se de sistemas inteligente por considerar as diversas variáveis e grandezas que estão envolvidas com os processos do controle do perfil de tensão. Decidiu-se pelo sistema Fuzzy. Toda essa Inteligência foi montada na placa de controle inteligente de tensão.

Foram desenvolvidos diversos testes de validação dessa placa e também foi desenvolvido um software para aquisição dos dados de leitura do sistema trifásico e o do tap atual do transformador, com armazenamento desses dados para posterior estudo.

Com esses três sistemas montados: placa de controle inteligente, módulos da eletrônica de potência e o transformador de distribuição, foram possíveis realizar ensaios experimentais. Primeiro testou-se em laboratório a placa acoplado aos módulos da eletrônica de potência, onde os resultados foram satisfatórios. Posteriormente, foi instalado em campo, o transformador piloto com os módulos inteligentes.

Os resultados obtidos dos ensaios em campo constataram que a solução desenvolvida faz a regulação de tensão na baixa tensão, trazendo benefícios para os setores com não conformidade da tensão e também para os setores de distribuição cujo transformador está sobrecarregado.

5 Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho de mestrado mostrou a importância do controle de tensão tanto para as concessionárias de energia elétrica que são penalizadas e cobradas, por meio dos órgãos reguladores, a fornecerem tensão em conformidade, quanto para o consumidor, que não querem ter seus equipamentos prejudicados em função de uma tensão fora dos padrões.

Mostrou-se cenário atual da regulação, as regras e penalidades devido à tensão de fornecimento e também se apresentou os principais procedimentos para o controle de tensão utilizados atualmente. As soluções convencionais para a regulação da tensão estão na média tensão, o que não é suficiente para corrigir a tensão em todos os clientes ligados na baixa tensão.

Diante dessa lacuna técnica, a proposta desse trabalho de mestrado foi desenvolver um transformador com derivações no lado de baixa tensão e com comutação automática para regulação da tensão. Além do transformador com taps no lado secundário, o produto desenvolvido é composto de um sistema de comutação empregando a eletrônica de potência, do sistema de aquisição de dados, processamento e tomada de decisão e acionamento do sistema de comutação. Os ensaios experimentais em laboratório foram satisfatórios, ou seja, faz-se a comutação dos taps quando a tensão varia para valores fora da faixa adequada.

Esse protótipo tem o objetivo de ser uma solução prática para aqueles setores de transformação onde a regulação de tensão do lado de média tensão não é suficiente para garantir níveis adequados no lado de baixa tensão. Basta substituir o transformador convencional por esse produto. Portanto, pode suprir lacunas que

as técnicas convencionais possuem e assim disponibilizar ao setor de energia elétrica uma nova solução para a tratativa de problema envolvido na regulação de tensão em redes de distribuição.

Os ensaios realizados mostraram que essa solução traz benefícios não apenas para os setores com transgressões constatadas na tensão, como também a setores onde a sobrecarga no transformador ocorre.

Para os trabalhos futuros, sugere-se aprofundar nos ensaios experimentais e em campo e criar alternativas para contornar o problema da eletrônica de potência, que exige a interrupção da forma de onda por meio ciclo. Também sugere-se a investigação do aperfeiçoamento da estratégia proposta para o controle de tensão, incluindo também a compensação de reativos através dos transformadores especificados para esse fim.

Referências bibliográficas¹

- CHOI, J. H.; KIM, J. C. **The online voltage control of ULTC transformer for distribution voltage regulation.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 23, p. 91-98, fev. 2001.
- CONTI, S. et al. **Local Voltage Regulation in LV Distribution Networks with PV Distributed Generation.** SPEEDAM 2006 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pp. 23-28, 2006.
- GOMIDE, F.A.C.; GUDWIN, R.R., **Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy.** Revista Controle e Automação, vol. 4, no. 3, pp. 97-115, 1994.
- HSU, Y. Y., LU, F. C. **A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 13, Nº 4, p. 1265-1271, nov. 1998.
- KAGAN, N.; ROBBA, Ernesto João; SCHMIDT, Hernán Prieto . **Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica. 1. ed.** São Paulo: Edgard Blücher, 2009. v. 1. 230 p.
- KHATOR, S.K.; LEUNG, L.C., **Power distribution planning: a review of models and issues Power Systems,** IEEE Transactions on , vol.12, no.3, pp.1151,1159, Aug 1997.
- KULKARNI, D. B., UDUPI, G.R. **ANN-Based SVC Switching at Distribution Level for Minimal-Injected Harmonics.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol, 25, no. 3, pp. 1978-1985, 2010.
- LEE, C.C., **Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controllers – Part I and II.** IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 20, pp. 404-435, 1990.
- LIANG, R. H., WANG, Y. S. **Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 18, n. 2, p. 610-618, abr. 2003.
- LIU, Y. ZHANG, P. QIU, X. **Optimal volt/var control in distribution systems.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 24, n. 4, p. 271-276, 2002.
- MCQUEEN, D.H.O., HYLAND, P.R., WATSON, S.J. **Application of a Monte Carlo Simulation Method for Predicting Voltage Regulation on Low-Voltage Networks.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 1, pp. 279-285, 2005

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

- MIRANDA, V.; MOREIRA, A.; PEREIRA, J., **An Improved Fuzzy Inference System for Voltage/VAR Control**. Power Systems, IEEE Transactions on , vol.22, no.4, pp.2013,2020, Nov. 2007.
- O'GORMAN, R; REDFERN, M.A.; AL-NASSERI, H. **Voltage control for distribution systems**, Future Power Systems, 2005 International Conference on , vol., no., pp.6 pp.,6, 18-18 Nov. 2005.
- PAL, S.; NATH, S., **An intelligent on line voltage regulation in power distribution system**. Power, Control and Embedded Systems (ICPCES), 2010 International Conference, vol., no., pp.1,5, Nov. 29 2010-Dec. 1 2010
- PANSINI, J. A. **Guide to Electrical Power Distribution Systems**. Sixth Edition, New York: CRC Press, 2000. 276 p.
- PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F.. **An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design**. *Massachusetts Institute of Technology*, 1998.
- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). **Módulo 1 - Introdução**. Revisão 6, ANEEL, 61 pp., 2012.
- Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema de Distribuição Nacional (PRODIST) - **Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica** Revisão 6, ANEEL, 76 pp., 2014.
- PROVOOST, F., MYRZIK, J.M.A., KLING, W.L. **Optimizing lv voltage profile by intelligent MV control in Autonomously controlled networks**. Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference - UPEC '06, pp. 354-358, 2006.
- RANAMUKA, D.; AGALGAONKAR, A.P.; MUTTAGI, K.M., **Online Voltage Control in Distribution Systems With Multiple Voltage Regulating Devices**. Sustainable Energy, IEEE Transactions on , vol.5, no.2, pp.617,628, April 2014.
- SANTOSO, N. I.; TAN, O. T. **Neural-net based real-time control of capacitors installed on distribution systems**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, p. 266-272, jan. 1990.
- SEN, P. K; LARSON, S. L. **Fundamental concepts of regulating distribution system voltages**. In: Rural Electric Power Conference, 1994. Colorado Springs, USA, p. C1/1-C110, 1994.
- SHORT, T. A. **Electric Power Distribution Handbook**. New York: CRC Press, 2014.
- SHUANGPING ZHANG; QUING TIAN; XIANGNING LIN; ZHIQIAN Bo, **Improving voltage stability of power systems by appropriate applications of Reactive Current Droop Compensation and Line Drop Compensation schemes**, Modelling, Identification and Control (ICMIC), The 2010 International Conference on , vol., no., pp.448,453, 17-19 July 2010

- SIMAS FILHO, E., F. **Monitoramento de Reguladores de Tensão Utilizando Análise de Vibração Através de Sistemas Inteligentes**. 2004. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2004.
- SPATTI, D. H., **Sistemas Inteligentes para Controle de Relés Reguladores de Tensão**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- SUNDHARARAJAN, S.; PAHWA, A. **Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 9, p. 1499-1507, ago. 1994.
- TSIKALAKIS A.G., SOULTANIS, N.L., HATZIARGYRIOU, N.D. **On-line storage management to avoid voltage limit violations**. 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, pp. 1-6, 2006
- WILLIS, H. L., **Characteristics of Distribution Loads**, Electrical Transmission and Distribution Reference Book. Raleigh, NC, ABB Power T&D Company, 1997.
- ZADEH, L.A., **Fuzzy sets**. *Information and Control*, vol. 8, pp. 29-44, 1965.
- ZADEH, L.A., **Outline of new approach to the analysis of complex systems and decision**. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3, pp. 28-44, 1973.
- ZHIHAO YUN et. al. **Secondary Voltage Intelligent Control Method and Implement Based on Fuzzy Expert System**, Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES , vol., no., pp.1,5, 2005.

Referências bibliográficas adicionais¹

- BERGER, A.; HENNING, M.; KÖRNER, C., **Voltage control in smart distribution grids — Overview and practical experience of available solutions**. *Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on* , vol., no., pp.1,4, 10. -2013
- CALDERARO, V.; et. al. **Optimal Decentralized Voltage Control for Distribution Systems With Inverter-Based Distributed Generators**. *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.29, no.1, pp.230,241, 2014.
- CORSI, S.; DE VILLIERS, F.; VAJETH, R., **Secondary Voltage Regulation applied to the South Africa transmission grid**. *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE* , vol., no., pp.1,8, 25-29 July 2010.

- DAI, F T, **Voltage control of distribution networks with distributed generation.** *Developments in Power Systems Protection, 2012. DPSP 2012. 11th International Conference on* , vol., no., pp.1,6, 23-26 April 2012.
- DIWOLD, K.; et. al. **Coordinated voltage-control in distribution systems under uncertainty.** *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012 47th International* , vol., no., pp.1,6, 4-7 Sept. 2012.
- MUTTAQI, K.M.; et. al.. **A novel tuning method for advanced line drop compensator and its application to response coordination of distributed generation with voltage regulating devices.** *Industry Applications Society Annual Meeting, 2014 IEEE* , vol., no., pp.1,8, 5-9. 2014